



**Escola Politècnica Superior
de Castelldefels**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**TÍTULO DEL TFC: Integración de Protocolos de Acceso Avanzados en
Redes WLAN IEEE 802.11.**

**TITULACIÓN: Ingeniería Técnica de Telecomunicación, especialidad
Sistemas de Telecomunicación**

AUTOR: Cristian Crespo Cintas

DIRECTOR: Jesús Alonso

SUPERVISOR: Luis Alonso

FECHA: 21 de Julio de 2008

Título: Integración de Protocolos de Acceso Avanzados en Redes WLAN IEEE 802.11

Autor: Cristian Crespo Cintas

Director: Jesús Alonso

Supervisor: Luis Alonso

Fecha: 21 de Julio de 2008

Resumen

Las redes móviles ad hoc (MANETs) son redes inalámbricas distribuidas sin infraestructura formadas por un conjunto de dispositivos inalámbricos móviles. La ausencia de una entidad centralizada encargada de la gestión de la red implica que los dispositivos deben cooperar entre sí para establecer las comunicaciones. En la actualidad, estas redes se utilizan en situaciones muy diversas como conferencias, zonas rurales con dificultades de comunicación u operaciones de rescate en zonas donde la infraestructura no existe o ha quedado destruida.

La mayoría de dispositivos inalámbricos que operan en estas redes implementan la función básica de coordinación DCF definida en el estándar IEEE 802.11 como protocolo de acceso al medio (MAC). Este protocolo ofrece un buen rendimiento para bajas cargas de tráfico y para un número de usuarios no muy elevado. Sin embargo, a medida que el número de usuarios con dispositivos inalámbricos aumenta y proliferan nuevas aplicaciones multimedia con grandes requisitos de recursos de red, el rendimiento de este protocolo empieza a ser insuficiente. Por ello, resulta necesario diseñar nuevos protocolos MAC que ofrezcan buen rendimiento para cualquier número de usuarios y para elevadas cargas de tráfico.

En este trabajo se ha diseñado un nuevo protocolo MAC para redes inalámbricas de tipo ad hoc llamado Distributed Point Coordination Function (DPCF). El objetivo principal de diseño de este protocolo es el de aumentar el rendimiento de este tipo de redes en términos de *throughput* y retardo de transmisión. Asimismo, el DPCF se ha diseñado de manera que sea posible la coexistencia con los dispositivos estándar actuales, que llevan implementado el protocolo MAC del estándar 802.11. El rendimiento de DPCF se ha evaluado mediante simulación por ordenador, usando el simulador de redes inalámbricas MACSWIN. Se han implementado tres tipos de móviles MAC en este simulador. Uno de ellos implementa el nuevo protocolo MAC y los otros las funciones PCF y DCF del estándar 802.11.

Los resultados muestran que DPCF es capaz de aumentar el throughput total de una red ad hoc comercial, y mejorar notablemente el retardo de transmisión. Además, se ha comprobado que en un entorno real, el DPCF es compatible con dispositivos WLAN 802.11 y que es capaz de ofrecer altas velocidades de transmisión a los usuarios que lo lleven implementado.

Title: Integration of advanced medium access protocols into IEEE 802.11 WLAN networks

Author: Cristian Crespo Cintas

Director: Jesús Alonso

Supervisor: Luis Alonso

Date: July, 21st 2008

Overview

Mobile ad hoc networks (MANETs) are distributed wireless networks without infrastructure formed by a set of mobile wireless devices. The absence of a centralized entity in charge of the management of the network implies that the devices must cooperate with each other to establish the communications. Currently, these networks are used in very diverse situations such as conferences, rural areas with difficulties of communication or rescue operations in areas where the infrastructure does not exist or has been destroyed.

Most of the wireless devices that operate in these networks implement the basic coordination function DCF defined in the standard IEEE 802.11 as the Medium Access Control (MAC) protocol. This protocol offers a good performance for not very high traffic loads and for not very high number of users. However, as the number of users increases, the performance of this protocol begins to fall short in fulfilling the strict performance requirements of new multimedia applications and contents. Therefore, it is necessary to design new MAC protocols that offer high performance for any number of users and for high traffic loads.

In this work, we propose a new MAC protocol for wireless ad hoc networks called Distributed Point Coordination Function (DPCF). The main objective of the DPCF is to improve the performance of this type of networks in terms of throughput and delay. In addition, the DPCF has been designed so that coexistence is possible with standard devices which implement the IEEE 802.11 MAC. The performance of the DPCF has been evaluated by means of computer simulation. Three different MAC protocols have been implemented in the MACSWIN simulator, namely, the DPCF, and both the PCF and the DCF access methods of the standard 802.11.

The results show that the DPCF outperforms the standard in terms of throughput and delay. It has also been demonstrated that the DPCF protocol could coexist with legacy 802.11 devices, offering superior performance for DPCF users, at almost no cost for standard users.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a mi director Jesús Alonso y a mi Supervisor Luis Alonso el apoyo, la ayuda y los consejos que me han ofrecido a lo largo del trabajo.

Finalizar el trabajo de fin de carrera supone cumplir un reto personal muy importante como es el de superar con éxito 3 años de estudio en los que se pone a prueba la capacidad técnica y la fortaleza anímica de cada persona. En este sentido quiero destacar la importancia del apoyo de la persona más importante en mi vida, que me ha ayudado no solo durante el desarrollo de este proyecto sino a lo largo de mis estudios y desde el primer día que la conocí. Quiero dedicar este proyecto de forma muy especial a mi pareja Iris que ha sido la persona más cercana durante todo este tiempo y la pieza fundamental para seguir adelante y conseguir finalizar con éxito el trabajo. Quiero darle las gracias por todo el cariño que me ha dado siempre, por escucharme y animarme en todos los momentos malos por los que he pasado, por esperarme semana tras semana por la reclusión de los fines de semana de estudio y por estar ahí en todos los momentos en los que la he necesitado. Todos los esfuerzos e ilusiones de este trabajo te los dedico especialmente a ti.

Por último, no puedo olvidar de agradecer el apoyo y la fuerza que me ha dado mi familia, en especial mis padres y mi hermano, a quienes también dedico este trabajo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN, MOTIVACIONES Y OBJETIVOS.....	3
1.1. Historia de las redes ad hoc.....	3
1.2. Mobile Ad Hoc Networks (MANETs)	3
1.2.1. Definición	3
1.2.2. Ventajas e inconvenientes.....	4
1.2.3. Entornos de aplicación	4
1.2.4. Importancia de los protocolos MAC	5
1.3. El estándar IEEE 802.11	6
1.3.1. Introducción	6
1.3.2. Características técnicas	6
1.4. Motivación	7
1.5. Objetivos del trabajo	9
CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE PROTOCOLOS MAC.....	10
2.1. Introducción	10
2.2. Distributed Coordination Function (DCF)	10
2.2.1. Introducción	10
2.2.2. Virtual Carrier Sensing	12
2.2.3. Resolución de colisiones.....	13
2.2.4. Prioridades de acceso al medio	14
2.3. Point Coordination Function (PCF)	14
2.3.1. Introducción	14
2.3.2. Sincronismo de la capa MAC	15
2.3.3. Mecanismo de combinación de paquetes	16
2.4. DQMAN Protocol.....	17
CAPITULO 3. EL SIMULADOR MACSWIN	19
3.1. El entorno de trabajo.....	19
3.2. Modificación del Núcleo del programa	22
3.3. Modificación de la parte visual	22
3.4. Definición de las métricas de simulación	24
CAPÍTULO 4. UN NUEVO PROTOCOLO MAC: DPCF	25
4.1. Introducción	25
4.2. Descripción del protocolo	25
4.2.1. Introducción	25

4.2.2.	Mecanismo de Clustering	26
4.2.3.	Inicialización de un Cluster	27
4.2.4.	Duración de un Cluster	29
4.3.	Evaluación del rendimiento de DPCF.....	30
4.3.1.	Definición del entorno de simulación.....	30
4.3.2.	Evaluación de los resultados.....	32
4.3.3.	Conclusiones	37
CAPÍTULO 5.	INTEGRACIÓN DEL DPCF EN REDES 802.11	38
5.1.	Introducción.....	38
5.2.	Descripción del entorno mixto.....	38
5.2.1.	Coexistencia de terminales 802.11 y DPCF.....	38
5.3.	Evaluación del rendimiento de la red Mixta.....	41
5.3.1.	Definición del entorno de simulación.....	41
5.3.2.	Evaluación de los resultados.....	41
5.3.3.	Conclusiones	45
CAPITULO 6.	EVALUACIÓN DEL DPCF EN ENTORNOS MULTI HOP	46
6.1.	Introducción y motivaciones.....	46
6.2.	Escenario de estudio	46
6.3.	Modificación del DPCF.....	48
6.4.	Evaluación del DPCF en entornos multi hop.....	49
6.4.1.	Evaluación de los resultados.....	49
6.4.2.	Conclusiones	51
CAPITULO 7.	CONCLUSIONES	52
7.1.	Conclusiones técnicas.....	52
7.2.	Estudio medioambiental	53
7.3.	Líneas futuras de investigación.....	53
BIBLIOGRAFÍA		55
LISTA DE FIGURAS.....		56
ANEXOS		57
ANEXO I.	IMPLEMENTACIÓN DE TRES NUEVOS PROTOCOLOS DE ACCESO EN MACSWIN	57

INTRODUCCIÓN

La evolución y el abaratamiento de la tecnología en los últimos años han fomentado la popularización de las de las comunicaciones inalámbricas. Los usuarios desean establecer comunicaciones en cualquier momento, en cualquier lugar, y sin depender de la presencia de una instalación previa. Esta idea de ubicuidad de las comunicaciones tiene su máximo exponente en las redes móviles ad hoc inalámbricas, conocidas como MANETs [1] . Este trabajo se centra en el contexto de las MANETs.

En la actualidad, la mayoría de dispositivos en estas redes operan cumpliendo con en el estándar 802.11 [2] . Este protocolo ofrece un buen rendimiento para cargas de tráfico no muy elevadas y para un número de usuarios no muy elevado. Sin embargo, el aumento del número de usuarios inalámbricos y la aparición de nuevas aplicaciones multimedia ha provocado que el rendimiento de estas redes empiece a ser insuficiente.

En los últimos años, la investigación ha aportado nuevos mecanismos que mejoran considerablemente el rendimiento de estas redes. Este trabajo se centra en los protocolos de acceso al medio (MAC), que rigen el acceso de varios usuarios a un medio común (el canal radio). El protocolo Distributed Queuing MAC Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DQMAN) es un ejemplo de nuevo mecanismo propuesto en los últimos años [3] .DQMAN integra un protocolo MAC de alta eficiencia con un algoritmo dinámico y espontáneo de clustering. El resultado es un protocolo que ofrece un rendimiento cercano al máximo teórico bajo ciertas condiciones de red. Sin embargo, para que estas propuestas sean una realidad práctica, es necesario encontrar mecanismos que consigan compatibilizar estas nuevas propuestas con la tecnología estándar actual. La motivación principal de este trabajo es el de aplicar las ideas del protocolo DQMAN a un entorno basado en el estándar IEEE 802.11. Para ello, se ha diseñado un nuevo protocolo MAC para redes inalámbricas de tipo ad hoc llamado Distributed Point Coordination Function (DPCF), que combina los modos de operación distribuida y centralizada del estándar usando la filosofía de clusterización dinámica de DQMAN.

Mediante el simulador MACSWIN se ha realizado una evaluación del nuevo protocolo. Esto ha permitido comprobar su comportamiento en diferentes entornos y comparar estos resultados con redes estándar 802.11.

El trabajo está organizado de la siguiente manera:

En el primer capítulo se realiza una introducción a las redes ad hoc y al estándar IEEE 802.11 y se describe la motivación de este proyecto así como los objetivos principales.

En el segundo capítulo se hace una descripción básica del funcionamiento y de los principales mecanismos de los dos protocolos MAC que define el estándar IEE 802.11 (DCF y PCF) y del protocolo DQMAN con el objetivo de conocer el funcionamiento básico de cada uno de ellos.

En el tercer capítulo se describe el simulador MACSWIN y se analiza la estructura básica del programa. Se describen las modificaciones realizadas durante el desarrollo del trabajo y los parámetros más importantes para el desarrollo del proyecto.

En el cuarto capítulo se presenta el nuevo protocolo DPCF. Se realiza una descripción del funcionamiento y una evaluación del rendimiento mediante simulaciones.

En el quinto capítulo se ha estudiado la coexistencia entre el protocolo DPCF y el 802.11 y se ha evaluado, mediante simulaciones, el rendimiento de una red mixta, en la que existen usuarios de los dos tipos (DCF y 802.11).

En el sexto capítulo se ha evaluado el comportamiento del DPCF en un entorno multi hop con el objetivo de comprobar que es capaz de funcionar en estas redes.

Por último, en el último capítulo se presentan las conclusiones del trabajo, así como un pequeño análisis medioambiental del trabajo. En este último capítulo se presentan algunas posibles líneas de investigación futuras.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN, MOTIVACIONES Y OBJETIVOS

1.1. Historia de las redes ad hoc

Los inicios de las redes ad hoc se remontan a mediados de los años setenta cuando la agencia de investigación *Defense Advance Research Projects Agency* (DARPA) decidió crear el proyecto *Packet Radio Network* (PRNet), inspirado en la eficiencia de la tecnología de conmutación de paquetes y su posible aplicación a las redes inalámbricas [1]. En una red PRNet, los usuarios y nodos (routers) se implementaban en dispositivos diferentes y eran todos móviles a pesar de que su movilidad era limitada.

Gracias al progreso a lo largo del tiempo y al avance de la tecnología electrónica fue posible integrar nodos y usuarios en un único dispositivo llamado Nodo Ad hoc, y a la interconexión entre estos nodos se le denominó red Ad Hoc.

La investigación activa de las redes ad hoc se inició en 1995 en la conferencia del IETF (Internet Engineering Task Force) y continúa siendo hoy en día uno de los campos en tecnologías inalámbricas más investigados a pesar de que todavía no existe una aplicación masiva real en el mercado.

1.2. Mobile Ad Hoc Networks (MANETs)

1.2.1. Definición

Las redes móviles ad hoc, también conocidas como MANETs, son redes formadas por un conjunto de dispositivos móviles conectados entre sí a través de un medio inalámbrico [1]. En estos sistemas los dispositivos se organizan dinámicamente de forma autónoma ya que no existe ningún tipo de administración central o infraestructura.

En una red ad hoc, cada dispositivo actúa de forma individual como usuario de una red que genera o recibe información, pero también actúa como nodo de red y coopera en tareas de enrutamiento de información.

Las comunicaciones en estos entornos se realizan de forma directa entre dos dispositivos cuando se encuentran en zonas geográficas relativamente cercanas, estableciendo enlaces punto a punto.

Sin embargo, debido a la movilidad de estos dispositivos, y a la posible desconexión de algunos de ellos a lo largo del tiempo, no existe una topología de red estable y no siempre todas las estaciones están en un mismo rango de transmisión. En ese caso, las comunicaciones deben realizarse mediante múltiples saltos (entorno multi hop).

1.2.2. Ventajas e inconvenientes

Las redes inalámbricas ad hoc ofrecen muchas ventajas frente a las redes centralizadas:

1. Dispositivos autoconfigurables. Los terminales no necesitan ningún tipo de infraestructura para funcionar. Cada dispositivo es capaz de adaptarse de forma automática a cualquier entorno ad hoc.
2. Flexibilidad. Una de las ventajas más importantes es la facilidad con la que se crean este tipo de redes. Simplemente es necesario la existencia de dos o más dispositivos en una zona geográfica cercana para que se pueda establecer una red ad hoc.
3. Movilidad. Los usuarios pueden ser móviles y mantenerse conectados a una red ad hoc desde cualquier lugar siempre que exista como mínimo un usuario ad hoc con el que comunicarse.
4. Bajo coste económico. Debido a su inexistente infraestructura los costes de estas redes son prácticamente nulos y únicamente es necesario que el dispositivo lleve instalada una tarjeta inalámbrica que implemente un protocolo adecuado para este tipo de redes.

Sin embargo, estas redes, al estar basadas en comunicaciones por radio, están todavía en pleno desarrollo y su comportamiento presenta algunos inconvenientes frente a las comunicaciones cableadas:

1. Velocidades de transmisión bajas. las comunicaciones inalámbricas aún no son capaces de ofrecer rendimientos tan elevados como en las comunicaciones por cable. Sin embargo, se están desarrollando mejoras que pueden llegar a igualar las velocidades de transmisión de esas redes en un futuro no muy lejano (el estándar 802.11n es un ejemplo de ello, basado en la integración de múltiples antenas en transmisión y recepción para explotar la diversidad espacial).
2. Consumo de energía. Los dispositivos inalámbricos utilizan baterías como principal fuente de alimentación. Es necesario utilizar mecanismos que minimicen el consumo de estos dispositivos para evitar problemas de rendimiento en las redes ad hoc.
3. Interferencias. Los dispositivos inalámbricos trabajan en bandas de frecuencia sin licencia, en las que también transmiten otro tipo de sistemas de telecomunicación como microondas o sistemas *bluetooth* y por lo tanto, están expuestos a constantes interferencias.

1.2.3. Entornos de aplicación

El interés en las redes ad hoc ha ido aumentando a lo largo de los últimos años gracias a la evolución tecnológica y a la aparición de nuevos soportes inalámbricos. Este tipo de redes se utilizan en una gran variedad de entornos.

Tradicionalmente se han utilizado en entornos militares, en comunicaciones entre miembros de rescate de accidentes o catástrofes o en comunicaciones marítimas, donde las infraestructuras fijas no existen o han quedado destruidas. Actualmente esta tecnología se utiliza en multitud de entornos y situaciones:

- En congresos y conferencias.
- En campus universitarios.
- En el ámbito doméstico (Domótica).
- En el ámbito industrial (automatización de la gestión de almacenes, control de procesos...).
- En redes de vehículos (VANETs) o redes de sensores (monitorización ambiental, telemedidas, telecontrol).
- En aplicaciones médicas (BANETs).
- En seguridad y control de acceso.
- Logística.
- Gestión de flotas.

1.2.4. Importancia de los protocolos MAC

Los protocolos MAC se utilizan en redes de comunicación cuando múltiples usuarios compiten por acceder al mismo canal de transmisión. Definen el conjunto de reglas que han de cumplir los usuarios de una red cuando quieren acceder a un medio compartido.

Se pueden clasificar por el tipo de acceso al medio que utilizan. Los protocolos MAC aleatorios son aquellos en los que los usuarios acceden al canal cuando lo creen conveniente. Los deterministas son aquellos en los que se realizan reservas del canal para evitar las colisiones.

En un entorno ad hoc se hace indispensable optimizar el funcionamiento de estos protocolos MAC debido a la naturaleza autoconfigurable de los dispositivos que operan en ellas y a la inexistencia de un dispositivo centralizado que gestione el acceso al medio.

Cualquier protocolo MAC debe ser capaz de garantizar capacidad a los usuarios de la red frente a diferentes cargas de tráfico, utilizar el mínimo porcentaje de paquetes de control por cada paquete de datos para evitar pérdidas de eficiencia en la red, y reducir la probabilidad de colisión en los accesos al medio.

La mayoría de dispositivos en redes ad hoc llevan implementado el protocolo MAC definido en el estándar IEEE 802.11. En el siguiente apartado se puede consultar una breve descripción.

1.3. El estándar IEEE 802.11

1.3.1. Introducción

El IEEE 802.11 es uno de los estándares más populares para redes de área local inalámbricas, también conocidas como WiFi [2] . Apareció en 1997 con el objetivo de ser una referencia mundial en las redes inalámbricas de área local (WLAN).

Su versión inicial ha evolucionado gradualmente a lo largo de los años. Desde entonces, han aparecido varias extensiones del estándar. Estas extensiones proponen mejoras con respecto al estándar anterior y normalmente son una corrección de alguno de sus apartados.

El 802.11b fue la primera extensión del estándar. En esta versión, los usuarios son capaces de alcanzar velocidades de transmisión de 11 Mbps gracias a un cambio una en la capa física. Los terminales trabajan en la banda de frecuencias de 2.4 GHz.

Posteriormente apareció la segunda extensión, 802.11a. Esta versión ofrece velocidades de hasta 54 Mbps en la banda de 5 GHz. mediante una capa física basada en OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex).

El 802.11g fue la tercera extensión de la versión original y es la evolución del 802.11b. Esta versión ofrece las mismas velocidades de transmisión que el 802.11a pero trabaja en la banda de frecuencias de 2,4 GHz. Es compatible con la versión 802.11b. En la actualidad, las versiones 802.11b y 802.11g son las que se utilizan en dispositivos inalámbricos.

Sin embargo no todas las extensiones del estándar original han propuesto mejoras en velocidad de transmisión o cambios de la banda de frecuencias. La extensión 802.11e ofrece calidad de servicio (QoS) gracias a una modificación en la capa MAC. La extensión 802.11i ha propuesto mejoras en seguridad debido a la vulnerabilidad del estándar 802.11 original.

El número de versiones del estándar sigue aumentando a medida que pasa el tiempo. Una de las extensiones que está actualmente en desarrollo es la versión 802.11n. Su característica más importante es el aumento de velocidad de transmisión que será capaz de ofrecer (hasta 100Mbps), gracias al uso de sistemas MIMO (Multiple Input Multiple Output) que permite transmitir y recibir información a través de múltiples antenas. Esta versión será compatible con el resto de extensiones del 802.11 incluyendo la versión original.

1.3.2. Características técnicas

La estructura del modelo de referencia del estándar se ha mantenido casi inalterable en todas las versiones posteriores a la inicial. Se estructura en dos capas; la capa física (PHY) y la capa de enlace (ver Figura 1).

La capa física define tres tecnologías diferentes: Infrarrojos, Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) and Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS). Cada versión del estándar utiliza una tecnología física distinta. Puede trabajar en las bandas de 2,4 o la de 5 GHz. La capa de enlace queda definida en dos sub capas. Una de ellas es la Logical Link Control (LLC), encargada de la conexión lógica entre la capa MAC y las capas superiores, y la otra es la capa MAC.

La capa MAC es la encargada de los procedimientos de asignación de canal, del direccionamiento de paquetes, de la detección de errores, y de las tareas de fragmentación.

La capa MAC ofrece la posibilidad de acceso al medio mediante contienda al canal, o libre de contienda en función del método de acceso utilizado; DCF o PCF respectivamente.

El método de acceso distribuido se llama Distributed Coordination Function (DCF). Su operación se basa en el mecanismo de *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA). La filosofía de este mecanismo es “escuchar antes de hablar” y su funcionamiento se describe en el apartado 2.2.

El método de acceso centralizado se llama Point Coordination Function (PCF). Un AP (AP) gestiona el acceso al medio mediante un sistema de *polling*. Su funcionamiento se describe en el apartado 2.3.

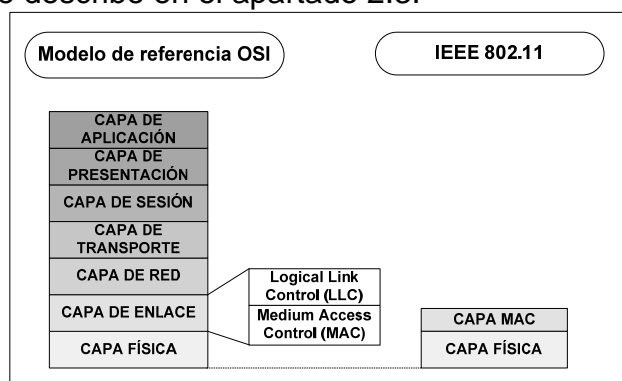


Figura 1. Modelo de referencia del estándar IEEE 802.11

1.4. Motivación

La mayoría de dispositivos inalámbricos que trabajan en redes ad hoc llevan implementado alguna de las extensiones del estándar IEEE 802.11. Las redes ad hoc solo pueden trabajar con la función DCF al no disponer de infraestructura. Esta función ofrece grandes prestaciones en entornos con bajas cargas de tráfico y pocos usuarios y hasta ahora era una excelente solución en todo tipo de entornos inalámbricos.

Sin embargo, el aumento de dispositivos inalámbricos en el mercado y la aparición de nuevos servicios y aplicaciones multimedia ha provocado que las

redes inalámbricas empiecen a saturarse de usuarios que demandan velocidades de transmisión cada vez mayores.

Se lleva muchos años investigando nuevas técnicas y mecanismos que mejoran las comunicaciones en redes ad hoc. Actualmente existen numerosas propuestas de protocolos MAC para este tipo de redes que mejoran el rendimiento del DCF en redes ad hoc y todas ellas podrían considerarse una buena alternativa.

El protocolo MAC DQMAN [3] es una de estas propuestas. Este protocolo es una extensión para redes ad hoc del protocolo DQCA [4] utilizado en redes con infraestructura. En una red DQMAN, los usuarios se organizan en clusters temporales dentro de los cuales se aplica un protocolo MAC similar al DQCA.

Sin embargo, ninguna de estas propuestas es hoy una realidad debido a su incompatibilidad con el estándar IEEE 802.11. Por lo tanto, aparece la necesidad de investigar nuevos mecanismos para redes ad hoc que mejoren el rendimiento de las comunicaciones y que sean capaces de coexistir con terminales estándar.

Los buenos resultados del DQMAN en redes ad hoc han motivado el contenido del trabajo presentado en la siguiente sección y cuya idea básica se muestra gráficamente en la Figura 2 y se describe a continuación.

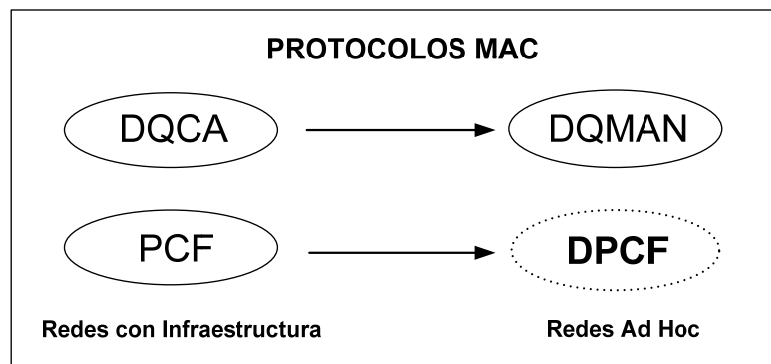


Figura 2. Extensión DQCA y PCF a redes sin infraestructura

La función PCF ofrece grandes mejoras de rendimiento en entornos con un número elevado de usuarios y para cargas altas de tráfico. Sin embargo, su aplicación en redes ad hoc no ha sido posible hasta ahora debido a la inexistencia de un dispositivo centralizado que gestione la red.

En este proyecto se propone el protocolo MAC DPCF como una extensión de la función de coordinación PCF para redes sin infraestructura (ad hoc), basándose en la extensión del DQCA propuesta por el DQMAN para el mismo tipo de redes.

1.5. Objetivos del trabajo

El objetivo principal del proyecto es diseñar y evaluar el rendimiento de un nuevo protocolo MAC que sea capaz de integrar las ideas generales del funcionamiento de DQMAN, aplicado al estándar IEEE 802.11.

Este protocolo debe ser capaz de mejorar el rendimiento del protocolo MAC definido en el estándar IEEE 802.11. Además, se considera imprescindible que el nuevo protocolo diseñado pueda coexistir con usuarios estándar 802.11.

El protocolo se implementará en el simulador de redes inalámbricas MACSWIN y se estudiará su rendimiento en entornos aislados, en los que la totalidad de los usuarios de la red implementan el mismo protocolo, y en entornos mixtos donde se estudiará la coexistencia en la misma red de dos tipos de protocolos.

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE PROTOCOLOS MAC

2.1. Introducción

En este capítulo se realiza una breve descripción de tres protocolos MAC. En los dos primeros apartados, se describen los dos métodos de acceso del estándar IEEE 802.11 conocidos como funciones básicas de coordinación, DCF y PCF. En el último apartado, se describe el funcionamiento básico del protocolo MAC DQMAN.

2.2. Distributed Coordination Function (DCF)

2.2.1. Introducción

La función DCF es el método de acceso al medio fundamental definido en el estándar IEEE 802.11. Es obligado que todos los dispositivos inalámbricos estándar la lleven implementada.

Es aplicable tanto a redes distribuidas (ad hoc) como a redes en modo infraestructura. En modo infraestructura la función DCF puede trabajar conjuntamente con la función PCF ya que en estas redes un AP es el encargado de canalizar el tráfico y gestionar el acceso al medio de los usuarios de la red.

Los periodos de DCF son denominados también periodos de contienda (CP) ya que los usuarios deben esperar durante un tiempo determinado a que el canal permanezca libre antes empezar a transmitir.

El método de acceso básico al medio se representa gráficamente en la Figura 3. Cuando un usuario tiene datos a transmitir realiza una escucha de canal llamado *Clear Channel Assessment* (CCA). Durante un periodo de tiempo DIFS (Distributed Coordination Function Interframe Space), el canal debe permanecer libre. Si esto sucede el usuario empieza la transmisión de datos.

Si el destino recibe correctamente el paquete de datos, envía un paquete de reconocimiento ACK a la estación origen un tiempo SIFS (Short Interframe Space) después de haber interpretado el paquete para confirmar la correcta comunicación. El tiempo de espera SIFS es necesario para compensar los retardos de propagación y proporciona prioridad al reconocimiento de paquetes frente a la transmisión de datos.

El estándar IEEE 802.11 define un mecanismo alternativo para el DCF que permite reservar recursos de ancho de banda a un terminal durante una comunicación mediante el uso de paquetes de control Request-to-Send (RTS) y Clear-to-Send (CTS). En la Figura 4 se puede observar gráficamente su funcionamiento. La metodología de acceso al medio es similar al caso anterior. Cuando un usuario quiere acceder al canal, realiza una escucha del canal de la

misma forma que en el caso anterior. Si el canal permanece libre durante un tiempo DIFS el terminal empieza su comunicación. El primer paquete transmitido por el usuario después de la contienda al canal no es el paquete de datos, sino un paquete de control llamado RTS. Cuando la estación destino recibe el paquete RTS correctamente contesta con un paquete CTS un tiempo SIFS después. Un tiempo SIFS después de recibir el CTS, y siempre que el canal esté libre, se inicia la transmisión de datos. Si la transmisión ha sido correcta, el destino enviará un paquete de reconocimiento ACK un tiempo SIFS después de haber recibido los datos.

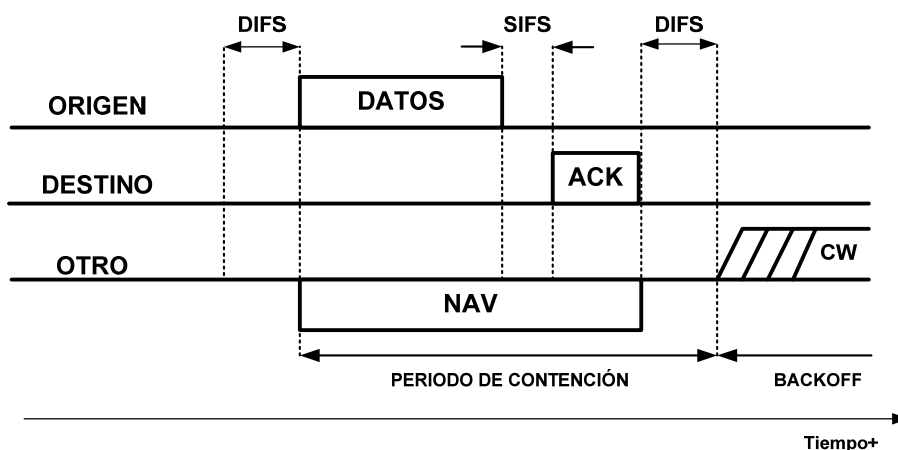


Figura 3. Acceso básico al canal mediante la función de coordinación DCF

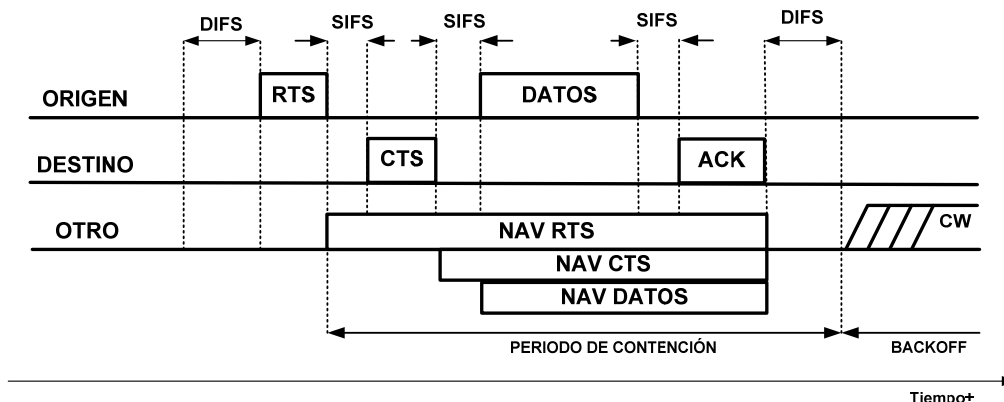


Figura 4. Acceso al canal mediante RTS/CTS en la función de coordinación DCF

El mecanismo de RTS/CTS se utiliza en situaciones donde el número de usuarios es elevado ya que ofrece mejoras de rendimiento frente a un acceso básico normal:

1. Cuando se produce una colisión, los paquetes afectados son del tipo RTS y no contienen datos útiles. Tanto los paquetes de RTS como los de datos contienen un número de bits de cabecera. Sin embargo, solo los paquetes de datos contienen una parte de la trama Mac de longitud variable entre 0 y 2312 bytes donde se pueden adjuntar información. Por ese motivo, el número de bits perdidos en una colisión entre paquetes RTS es menor y el ancho de banda perdido es menor que en caso anterior.

2. Es un mecanismo de protección frente a terminales ocultos (hidden terminal problem). Este problema aparece cuando un usuario de una red se encuentra en el rango de transmisión de un receptor pero se encuentra fuera del rango de transmisión del transmisor. Al escuchar el canal el usuario interpreta que está libre a pesar de la existencia de una comunicación activa entre otros dos usuarios. Mediante el envío de paquetes CTS en los receptores se notifica a todos estos terminales ocultos la existencia de una comunicación.

Además de su funcionamiento, la función DCF es conocida por el uso de mecanismos específicos que la caracterizan y que la hacen una función de acceso al medio diferente a las demás.

Tal y como se puede observar en las figuras anteriores, la función DCF utiliza un gran número de intervalos de silencio en los que no se transmiten datos. Uno de ellos son los periodos de contienda (o de Backoff), y se utilizan para reducir la probabilidad de colisión en el inicio de una comunicación. Por otro lado, existen los periodos de tiempo de espera (SIFS, DIFS) que otorgan prioridades de acceso en diferentes situaciones. En los apartados 2.2.3 y 2.2.4 se puede consultar una breve descripción de cada uno de ellos.

Uno de los mecanismos más importantes definidos en el estándar 802.11 es el Virtual Carrier Sensing. Este mecanismo evita que los usuarios ajenos a una comunicación intenten acceder al medio. En el siguiente apartado se puede consultar una descripción de su funcionamiento.

2.2.2. Virtual Carrier Sensing

El *Virtual Carrier Sensing* es una función definida en el estándar IEEE 802.11 para la capa MAC. Es un mecanismo mediante el cual un usuario no intenta transmitir, aunque vea el canal libre, porque sabe que alguien lo está utilizando.

Para conseguirlo, la estación origen de la comunicación utiliza uno de los campos de la cabecera MAC definido en el estándar como "Duration Field".

Los usuarios que detectan esta información en un paquete actualizan su NAV (Network Allocation Vector) (ver Figura 3 y Figura 4). El NAV es un contador que indica el tiempo restante que el canal permanecerá ocupado y su valor se decrementa a medida que pasa el tiempo. Este mecanismo bloquea los terminales durante el tiempo que dura el NAV y de esta forma se evita que intenten acceder al canal.

El NAV se actualiza a un valor distinto en función del paquete que detecte.

- Paquete de Datos. El valor del NAV corresponde al tiempo que dura la transmisión del paquete de datos hasta que se recibe el paquete de reconocimiento ACK.

- Paquete RTS o CTS. El valor del NAV corresponde al tiempo necesario para realizar la comunicación completa de los datos. (Desde el RTS o CTS hasta el paquete de reconocimiento ACK).

2.2.3. Resolución de colisiones

Los dispositivos inalámbricos son half-duplex, es decir, no son capaces de recibir información en el mismo momento que están realizando una transmisión. Esto provoca que exista una alta probabilidad de colisión en este tipo de redes inalámbricas.

Debido a tiempos de propagación no despreciables, en una red inalámbrica 802.11 es posible que dos o más usuarios inicien una transmisión en el mismo instante de tiempo. Si esto ocurre, se produce una colisión. Una colisión no es detectada por el usuario transmisor hasta que no finaliza la transmisión del paquete.

Para evitar esta pérdida de eficiencia en la red debido a colisiones se utiliza un mecanismo de Backoff antes de iniciar una transmisión de datos. Todos los usuarios de la red que quieren acceder al canal deben aplicar el mecanismo de *Virtual Carrier Sensing* definido en el apartado 2.2.2 para determinar si el canal está libre u ocupado, y para no interrumpir una posible comunicación. Finalizada una posible comunicación, y un tiempo DIFS después que el canal permanezca libre, los usuarios deben aplicar un tiempo de espera aleatorio antes de iniciar la transmisión.

Este periodo temporal de espera se define como un número aleatorio de slots temporales en un intervalo que va de 0 a un número determinado de slots fijados por la ventana de contienda (CW). La ventana de contienda se fija a un valor mínimo determinado (CW_{min}), y se va incrementando hasta un valor máximo (CW_{max}) a medida que un usuario colisiona en una misma transmisión de un paquete de datos. Cuando el usuario consigue finalizar la transmisión con éxito, vuelve a resetear el valor de la ventana de contienda al valor mínimo inicial.

Existe la posibilidad de que un usuario no utilice esta ventana de contienda. Por un lado, el número de slots asignados es aleatorio y existe la posibilidad de que ese valor sea nulo. En ese caso, el usuario no aplica ningún tipo de periodo de Backoff. Por otro lado, no es necesario aplicar este periodo de Backoff cuando un usuario accede por primera vez al canal, y cuando el medio está libre.

En cualquier caso, este mecanismo no evita que los usuarios de la red colisionen, ya que existe la posibilidad de que dos o más usuarios obtengan el mismo valor de Backoff e inicien una transmisión en el mismo instante de tiempo. Sin embargo, minimiza la probabilidad de colisión y aumenta la eficiencia de la red.

2.2.4. Prioridades de acceso al medio

El tiempo transcurrido entre dos tramas MAC se define como “Interframe Space” (IFS). La duración de los tiempos IFSs corresponde a un número entero de slots temporales. Los slots temporales son las unidades de tiempo definidas en la capa PHY del estándar IEEE 802.11 [2] .

Se definen 4 tiempos de espera. Su finalidad es diferenciar prioridades de acceso al medio de los usuarios de la red. Cada uno de ellos se aplica en una situación distinta.

- SIFS (Short Interframe Space). Es el periodo de tiempo más pequeño de los cuatro. Se utiliza siempre que una estación recibe un paquete y tiene que contestar con un paquete de reconocimiento ACK o un paquete CTS.
- PIFS (Point Coordination Function Interframe Space). Es un periodo de tiempo algo mayor al SIFS. Lo utiliza el AP cuando inicia periodos de PCF y en general, se utiliza solo en los periodos libres de contienda al canal.
- DIFS (Distributed Coordination Function Interframe Space). Es el periodo de tiempo más largo de todos y lo utiliza cualquier dispositivo de la red cada vez que quiere acceder al canal.
- EIFS (Extended IFS). Es un periodo de tiempo que se aplica cuando la capa física (PHY) indica a la capa MAC que ha habido un error en la transmisión de una trama. Lo ejecuta el usuario que recibe un paquete de datos y no se cumple con éxito la comprobación de errores.

2.3. Point Coordination Function (PCF)

2.3.1. Introducción

El estándar IEEE 802.11 define una función de coordinación opcional para la capa MAC llamada Point Coordination Function (PCF). Los periodos de tiempo en los que se aplica esta función se denominan “periodos libres de contienda” (CFP).

Para su funcionamiento es necesario que exista un AP encargado de gestionar el acceso al medio de los terminales mediante el envío de paquetes de POLL (del inglés, encuesta o interrogación).

Durante los periodos de tiempo en los que se trabaja mediante la función PCF, los únicos usuarios que tienen permiso para transmitir son aquellos que reciben un paquete de POLL o que reciben datos y tienen que enviar un paquete de reconocimiento del tipo ACK. En ambos casos el acceso al medio se hace un tiempo SIFS después de haber recibido el paquete de POLL.

Un usuario que recibe un POLL puede enviar información al AP, o a cualquier usuario de la red (estableciendo un enlace punto a punto). En la Figura 5 se pueden observar las dos posibilidades de comunicación en un periodo PCF:

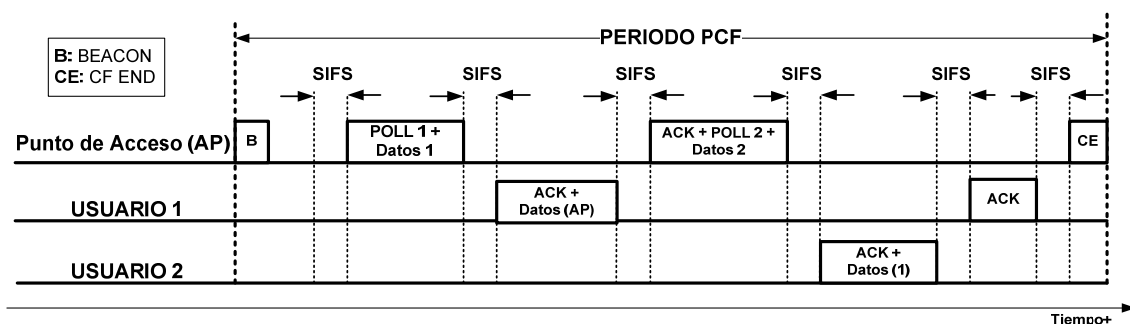


Figura 5. Acceso al medio mediante la función de coordinación PCF

1. Comunicación AP – Usuario 1. El AP envía un paquete combinado de datos y POLL hacia el usuario 1. Un tiempo SIFS después de recibir el paquete, el usuario 1 contesta al AP enviando un paquete de reconocimiento ACK combinado con datos con el mismo destino. Los paquetes combinados suelen ser de tipo datos, y se consigue enviar datos y control en un mismo paquete debido a que hay campos de esos paquetes que no se utilizan. En el apartado 2.3.3 se describen todas las posibles combinaciones de paquetes.
2. Comunicación Usuario1 – Usuario2. La comunicación empieza cuando uno de los dos usuarios recibe un POLL. Es posible que el AP adjunte datos en este paquete. El usuario 1 envía el paquete de datos al usuario 2 un tiempo SIFS después de interpretar el POLL. El usuario 2 envía un paquete de reconocimiento ACK un tiempo SIFS después de recibir los datos.

La función PCF prácticamente no se implementa en las tarjetas inalámbricas 802.11 existentes en el mercado. Por ese motivo, los dispositivos que la implementan deben combinar los periodos de PCF con periodos de DCF, puesto que esta última función la implementan la totalidad de dispositivos estándar.

El AP de la red es el encargado de sincronizar estos periodos y de informar a los usuarios de la red del inicio de cada uno. En el siguiente apartado se describe el funcionamiento del mecanismo de sincronismo de cada periodo.

2.3.2. Sincronismo de la capa MAC

La función PCF debe poder coexistir con la función DCF. Ambas funciones se aplican de forma periódica a lo largo del tiempo y el AP es el encargado de fijar el periodo de repetición de cada uno de ellos.

Los usuarios de la red pueden sincronizarse a los distintos periodos cuando detectan un paquete de control de tipo BEACON. Estos paquetes se transmiten de forma periódica y contienen información de la duración de cada periodo por separado, y del periodo de repetición de cada uno de ellos.

Los paquetes de BEACON indican el inicio de los periodos libres de contienda donde se aplican las reglas de la función de coordinación PCF. Se envía un tiempo PIFS después de la última transmisión al medio durante el periodo DCF.

Cuando el tiempo del periodo libre de contienda finaliza, el AP envía un paquete del tipo CF END para indicar a los usuarios de la red el inicio de un nuevo periodo de contienda donde se aplicarán las normas de la función DCF. En la Figura 6 se puede observar gráficamente la evolución temporal de los dos periodos.

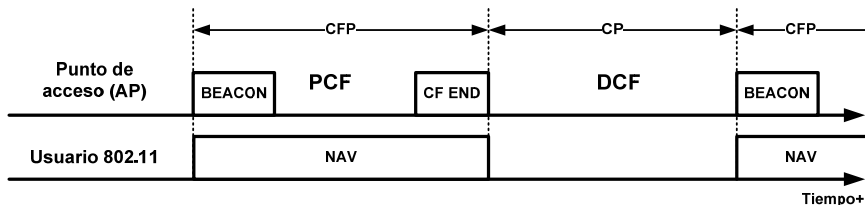


Figura 6. Sincronismo periodos DCF y PCF

Cuando el tráfico cursado por la red es bajo, el AP debe acortar el periodo de PCF y adjudicar el resto del intervalo al periodo DCF. El periodo de PCF deberá ser acortado también en el caso en el que una comunicación activa del periodo DCF anterior llegue a ocupar parte del tiempo dedicado a la libre contienda.

2.3.3. Mecanismo de combinación de paquetes

El mecanismo de combinación de paquetes se ideó para mejorar la eficiencia del sistema y disminuir el uso de paquetes de control en las transmisiones. En la Tabla 1 se puede observar el tipo de paquetes utilizados en la función PCF.

Las posibilidades de transmisión y de combinación de paquetes son diversas y varían en función del dispositivo que esté realizando la transmisión (ver Tabla 2). Los usuarios 802.11 que no implementan la función PCF no pueden utilizar el mecanismo de combinación. Sin embargo deben enviar paquetes de reconocimiento (ACK) cuando reciban información de otras estaciones o paquetes de POLL del AP.

Tabla 1. Tipos de Paquete MAC básicos en el periodo PCF

Tipo de paquete	Subtipo de paquete
Gestión	BEACON
Control	CF END
Datos	NULL
Datos	CF ACK
Datos	POLL
Datos	DATOS

Tabla 2. Paquetes MAC combinados en el periodo PCF

Access Point
CF END + CF ACK
POLL + CF ACK
POLL + DATOS
POLL + DATOS + CF ACK
Usuario PCF
DATOS + CF ACK

2.4. DQMAN Protocol

Por motivos de limitación de espacio, no es posible presentar una descripción formal del protocolo DQMAN en este trabajo. Sin embargo, en este apartado se presenta una breve descripción de los aspectos clave del protocolo que han inspirado el trabajo presentado en este proyecto. En [3] se puede consultar una descripción detallada del protocolo.

El DQMAN es un protocolo avanzado para redes ad hoc móviles. Los usuarios de la red se organizan de forma espontánea en clusters temporales, basados en una estructura **Master-Slave**. El mecanismo que utilizan para crear estos clusters está basado en el CSMA, mediante una función similar al método de acceso DCF del estándar (ver 2.2).

Cuando un usuario DQMAN tiene datos para transmitir, escucha el canal durante un tiempo aleatorio. Si durante ese tiempo, el canal permanece libre, el usuario crea un cluster temporal y opera en modo **Master**. Para indicar al resto de usuarios el inicio de un cluster, el Master envía periódicamente un paquete de control llamado Feedback Packet (FBP). Cualquier usuario que escucha un FBP se asocia a este cluster y pasa a trabajar en modo **Slave**.

Por el contrario, si durante ese tiempo el usuario detecta la presencia de un cluster (detecta paquetes FBP), se asocia al Master y trabaja en modo Slave. De forma periódica, y cada vez que finaliza una comunicación entre dos usuarios, el Master envía un paquete de tipo FBP (Feedback Packet). Este paquete contiene información de control de los minislots de acceso que permite a los usuarios ejecutar las reglas del protocolo.

La duración temporal de un cluster se mantiene en el tiempo hasta que se detecta que el conjunto de usuarios de ese cluster no tiene datos a transmitir, o cuando el Master ejecuta un Master Time Out (MTO).

El Master se encarga de distribuir la información necesaria para que los usuarios, de manera distribuida, sepan cuando acceder al canal. Dentro de cada cluster se ejecuta un protocolo MAC óptimo basado en el DQCA. En [4] se puede consultar una descripción de este protocolo. La diferencia principal se encuentra en la estructura de las tramas. En la Figura 7 se puede observar la estructura de la trama MAC de DQMAN.

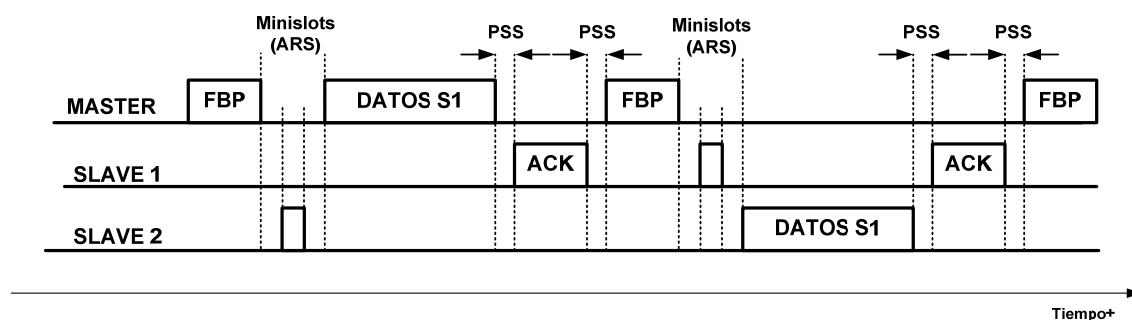


Figura 7. Estructura de trama MAC del DQMAN

La primera parte de la trama esta compuesta por un número de minislots de acceso. Cuando un usuario asociado a un cluster tiene datos a transmitir envía una petición de acceso en uno de estos minislots. La petición la realiza mediante una secuencia pseudoaleatoria de tipo ARS (Access Request Sequence) y no contiene ningún tipo de información explícita. Gracias a esta secuencia, el Master conoce si existen usuarios que necesitan acceder al medio, y distribuye el estado de los minislots, que únicamente es uno de tres posibles: vacío, éxito o colisión.

La segunda parte de la trama corresponde a un periodo libre de contienda y está dedicada a la transmisión de datos. El destino de ese paquete de datos ha de transmitir un paquete de reconocimiento (ACK) un tiempo PSS (Processing Silence Slots) después de interpretar los datos. Este tiempo de espera es necesario para compensar retardos de propagación o de procesado.

Una vez finalizada la comunicación entre dos usuarios el Master vuelve a enviar un paquete FBP y el proceso de acceso al medio se repite de forma periódica hasta que finaliza el cluster. El cluster finaliza cuando no hay más actividad de datos. De este modo, la estructura de clusters se adapta a la carga de tráfico de la red. En caso de muy altas cargas de tráfico, el mecanismo MTO fuerza al Master a romper el cluster pasado un cierto tiempo de operación en modo Master, independientemente de la carga de tráfico. De esta manera se fuerza la reconfiguración de la red y se reparte de una manera justa la responsabilidad de operar en modo Master entre los diferentes usuarios de una red.

CAPITULO 3. EL SIMULADOR MACSWIN

3.1. El entorno de trabajo

Existen muchas metodologías para evaluar el comportamiento de un protocolo MAC como por ejemplo, test beds, análisis matemáticos, simulaciones o incluso la implementación real en un sistema hardware.

En este proyecto se ha utilizado el simulador MACSWIN para evaluar el rendimiento de los protocolos MAC considerados en este trabajo. Este programa permite realizar simulaciones de diferentes protocolos MAC para redes de comunicaciones inalámbricas y es capaz de realizar medidas de su funcionamiento para posteriormente poder estudiar los resultados.

Una de las características más importantes es la posibilidad de visualizar en tiempo real el funcionamiento de las redes simuladas. Esta herramienta ofrece amplias ventajas en la evaluación de un protocolo, pero también permite comprobar el correcto funcionamiento de un protocolo durante su etapa de desarrollo.

El lenguaje de programación utilizado en este simulador es el Visual C++ .NET (ver. 2003). Este lenguaje está orientado a objetos.

El programa está estructurado en 2 partes. Una de ellas corresponde al núcleo principal del programa. Esta parte del simulador es la que contiene el código y las clases necesarias para modelar la red de comunicaciones. Es capaz de simular el comportamiento de un protocolo MAC, implementarlo en uno o varios móviles para formar una red, y realizar cálculos estadísticos de los resultados de la simulación tanto a nivel global de la red como a nivel individual por móvil.

La relación de las clases implementadas el núcleo del programa se muestra gráficamente en la Figura 8.

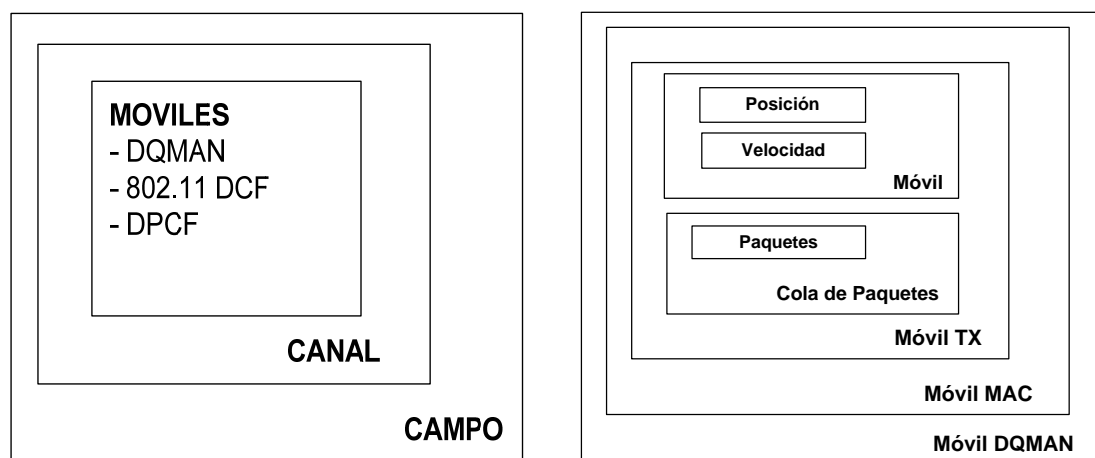


Figura 8. Interrelación de las clases del simulador MACSWIN

Los distintos móviles utilizan la clase canal para realizar las transmisiones. Esta clase es capaz de simular diferentes fenómenos físicos que se pueden

encontrar en una comunicación inalámbrica real, como problema de terminales ocultos, o pérdidas de propagación, así como fading o shadowing del canal.

Los móviles se mueven por la clase campo. Esta clase representa el escenario real de simulación. Se utiliza para situar los móviles en una posición y a una velocidad determinada cuando se realizan simulaciones.

Por último, existe una clase distinta para cada tipo de protocolo MAC cuya finalidad es definir las normas y los mecanismos básicos de cada protocolo en los móviles. Su nombre varía en función del tipo de protocolo que implementa (Móvil DQMAN, Móvil 802.11, Móvil DPCF,...). Esta clase hereda de un conjunto de clases genéricas que definen las características básicas de un móvil MAC real.

La clase Móvil MAC define e implementa los parámetros y las funciones comunes en todos los móviles MAC. De esta forma una única clase aporta funciones y parámetros comunes al conjunto de móviles programados.

La clase MAC hereda a su vez de la clase móvil TX. Esta clase contiene colas de paquetes e incluye las funcionalidades de transmisión y recepción. La clase móvil TX hereda de una clase básica llamada móvil que define el movimiento de los móviles mediante los objetos posición y velocidad en la clase Campo.

Todas estas clases forman el núcleo del programa y por sí solas podrían funcionar y simular el funcionamiento de redes inalámbricas. Sin embargo, el simulador MACSWIN consta de una segunda parte.

La parte visual es un complemento del programa. El objetivo es facilitar tareas de configuración de los parámetros característicos de cada simulación. Evita tener que modificar el código del programa cada vez que hay que realizar una nueva simulación.

La ventana principal permite fijar la duración temporal de cada simulación. La unidad mínima de tiempo en el simulador es la iteración. Cada iteración corresponde a 10 microsegundos. Además, es posible realizar simulaciones paso a paso. La simulación paso a paso permite detener el tiempo en cualquier iteración de la simulación y observar el estado de cada móvil o de la red en general. Esta característica ha sido muy importante en el momento de desarrollar las nuevas clases en este protocolo y en el estudio del comportamiento de cada protocolo.

En la ventana principal se puede visualizar el funcionamiento de los usuarios de la red si se desea, y comprobar que la simulación funciona como es debido. La Figura 9 muestra de forma gráfica la parte visual del simulador durante una simulación.



Figura 9. Ventana principal del simulador MACSWIN

Los círculos representan de forma ideal, el rango de transmisión y el rango de interferencia de cada móvil. En una situación real este rango no es geométricamente uniforme y depende de las condiciones instantáneas del canal radio.

En una simulación, cuando un móvil transmite información al canal, muestra de forma visual los dos círculos. Los móviles que se encuentren dentro del círculo interior detectan que existe una comunicación activa en el medio y la pueden decodificar correctamente. Los móviles que se encuentren en el círculo exterior detectan el canal ocupado pero no pueden decodificar los paquetes. Los usuarios que no se encuentran en ninguno de estos dos círculos no detectan ningún tipo de comunicación en el canal.

Por último, en la Figura 10 se puede observar el menú de la parte visual que permite realizar cambios en la configuración de las redes simuladas. Las posibilidades de configuración de la red son muy amplias y permiten crear escenarios muy distintos.

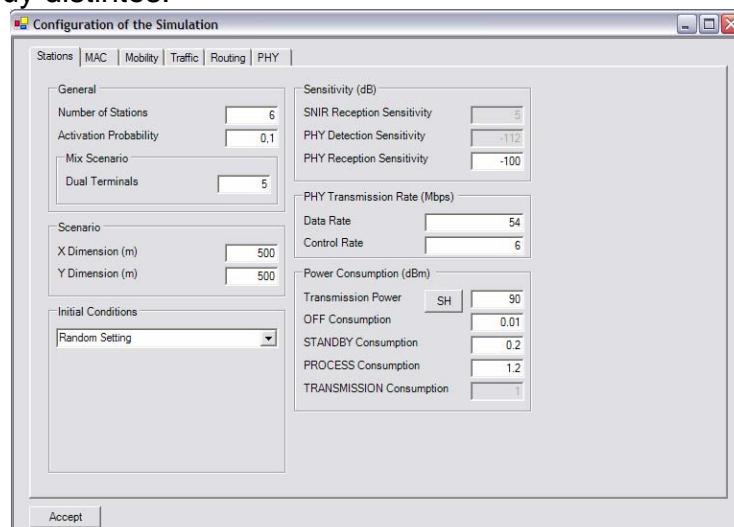


Figura 10. Menú de configuración del simulador MACSWIN

3.2. Modificación del Núcleo del programa

Para evaluar el nuevo protocolo, descrito en el apartado 4.2, así como las funciones de coordinación de estándar 802.11, ha sido necesario ampliar el simulador en las dos partes de su estructura principal.

Por un lado, se han creado tres nuevas clases que corresponden a tres móviles MAC.

1. Clase móvil DPCF. En esta clase se implementa las funciones básicas del protocolo MAC, definidas en el apartado 4.2, diseñado en el proyecto. El objetivo es poder estudiar el rendimiento de este protocolo en distintos escenarios.
2. Clase móvil 802.11 PCF. Esta clase implementa únicamente la función de coordinación PCF definida en el estándar IEEE 802.11. El objetivo es estudiar el comportamiento de una red estándar que únicamente aplica esta función.
3. Clase móvil 802.11 modo infraestructura. Esta clase implementa las dos funciones de coordinación (DCF y PCF) definidas en el estándar 802.11. El objetivo de este móvil es evaluar el rendimiento de las redes WLAN en modo infraestructura.

La implementación de estas clases se ha realizado de forma similar a otros móviles ya programados, con el objetivo de no modificar la estructura general del simulador.

Por ese motivo, ha sido necesario modificar parámetros y funciones de clases como móvil TX o móvil MAC debido a que todos los móviles MAC heredan de ellas. La implementación del código de estas tres clases y de las modificaciones del simulador no son el objetivo principal del trabajo sino el medio para alcanzar los objetivos planteados y por tanto han sido una parte fundamental en el desarrollo del mismo. Se puede consultar una descripción más detallada de las modificaciones realizadas en el anexo I.

3.3. Modificación de la parte visual

La implementación de nuevos protocolos MAC en el simulador ha provocado que se deba ampliar parte de la estructura visual del simulador. El objetivo ha sido facilitar la tarea de configuración de las simulaciones y poder visualizar en tiempo real algunos de los parámetros característicos de cada terminal.

A continuación se puede consultar una pequeña descripción de todas ellas.

1. Se ha ampliado la lista de configuración de la batería de simulaciones. La batería de simulaciones permite programar la configuración de un conjunto de simulaciones. En esta lista, se han añadido parámetros de tiempo de los periodos PCF y DCF, así como la duración temporal de los periodos de clustering del DPCF (ver Figura 11).

2. Se ha añadido una nueva pestaña llamada “PCF & DCF & DPCF” en el apartado MAC del menú de configuración para configurar los 3 nuevos móviles MAC (ver Figura 12)
3. Se han modificado los parámetros mostrados por los móviles en las simulaciones en tiempo real. De esta forma, es posible detectar posibles fallos, o comprobar el estado puntual de un usuario en un momento concreto de la simulación (ver Figura 13).
4. Se han añadido nuevos cálculos en los ficheros de resultados para evaluar aspectos concretos de los nuevos móviles.

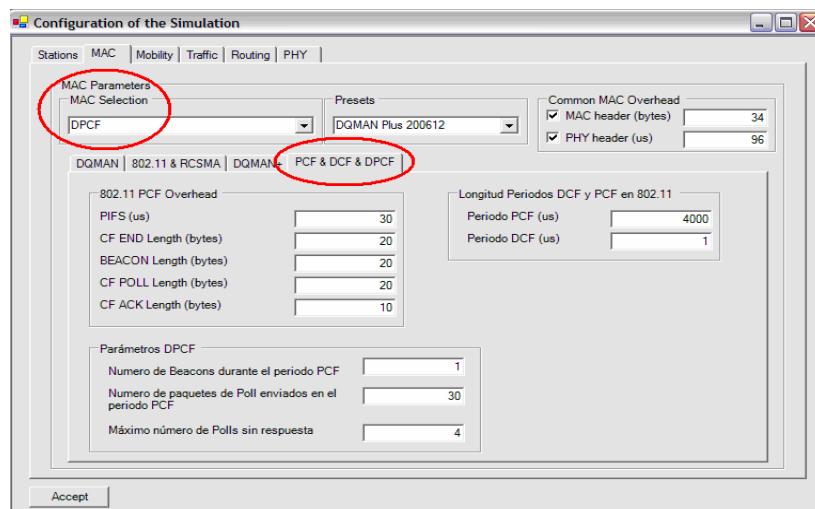


Figura 11. Ampliación del menú de configuración del simulador MACSWIN

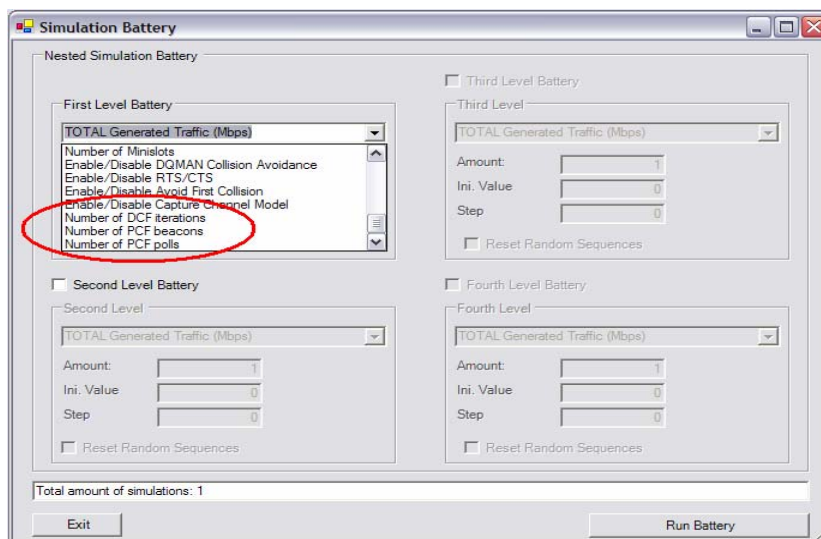


Figura 12. Ampliación del menú de baterías de simulación del simulador MACSWIN

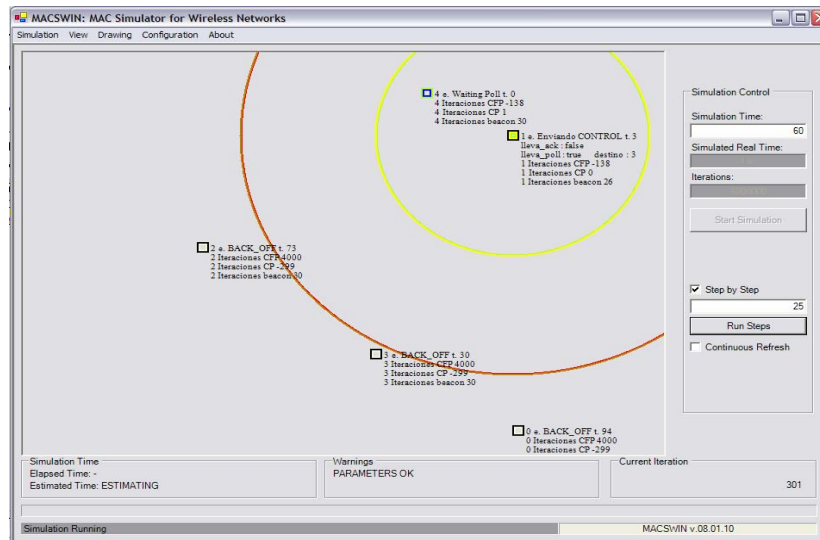


Figura 13. Modificación del estado de los móviles en la ventana principal durante una simulación del simulador MACSWIN

3.4. Definición de las métricas de simulación

En este apartado se definen las métricas utilizadas en la evaluación de los protocolos MAC (DCF, PCF y DPCF) implementados en el simulador MACSWIN.

1. Retardo de transmisión. Se define como el tiempo que transcurre desde que se recibe un paquete en la capa MAC hasta que es reconocido por el siguiente destino.
2. Retardo de transmisión a destino. Se define como el tiempo que transcurre desde que se recibe un paquete en la capa MAC hasta que es reconocido por el destino final.
3. Carga total de tráfico. Se define como la cantidad de bits por segundo que entregan todos los usuarios de la red simulada.
4. Throughput total. Se define como la cantidad de bits por segundo que una red es capaz de transmitir con éxito al canal (sin colisión).
5. Throughput a destino. Se define como la cantidad de bits por segundo que una red es capaz de transmitir con éxito al destino final (sin colisión).
6. Oportunidades de transmisión al canal (TXOP). Se define como el número de ocasiones por segundo en las que un usuario DPCF o PCF recibe o envía un paquete de POLL durante los periodos de PCF.
7. Probabilidad de transmisión en un TXOP. Se define como la relación entre las TXOPs que usan los usuarios para transmitir datos y el total de TXOPs. Un usuario tiene oportunidad de transmitir datos cuando recibe o envía un paquete de POLL.

CAPÍTULO 4. UN NUEVO PROTOCOLO MAC: DPCF

4.1. Introducción

Las numerosas extensiones del estándar IEEE 802.11 que han aparecido a lo largo de los años han aportado mejoras y correcciones a la versión inicial. La mayoría de estas mejoras se han centrado en la modificación de diferentes aspectos de la capa física, como los esquemas de transmisión o la banda de trabajo.

Sin embargo, ninguna de estas mejoras ha supuesto un cambio de la capa MAC del estándar, y las funciones de coordinación y, salvo pequeñas modificaciones, los mecanismos de acceso al medio continúan siendo prácticamente los mismos. De hecho, la mayoría de mejoras propuestas por las extensiones se han dirigido a redes con infraestructura fija, dejando de lado a las redes distribuidas que utilizan el mismo estándar.

En este proyecto se ha creado un nuevo protocolo MAC para redes ad hoc inalámbricas llamado Distributed Point Coordination Function (DPCF). La finalidad de este protocolo es contribuir a la investigación de las redes ad hoc y aportar mejoras a nivel de la capa MAC en este tipo de entornos.

A lo largo del capítulo se realiza una descripción del funcionamiento del DPCF. En la parte final del capítulo, se evalúa el rendimiento del DPCF mediante el simulador MACSWIN.

4.2. Descripción del protocolo

4.2.1. Introducción

El DPCF es un protocolo MAC diseñado para trabajar en entornos ad hoc inalámbricos. Inspirado en el mecanismo de DQMAN, el DPCF consta de un algoritmo de clustering integrado en un protocolo MAC.

La idea principal de DPCF es que los usuarios acceden al canal ejecutando el modo de acceso DCF. Una vez se consigue el acceso exclusivo al canal, se establece un cluster temporal, creando una estructura de Master-Slave.

El algoritmo de clustering se caracteriza por utilizar la cantidad mínima necesaria de información de control para conseguir que los usuarios se autoconfiguren en clusters de manera espontánea y temporal. Los usuarios asociados a cada cluster pueden realizar transmisiones de forma directa entre otros usuarios del cluster (peer-to-peer), y entre usuarios externos a este. Gracias a la aplicación de la estructura Master-Slave, es posible utilizar el protocolo MAC basado en la función de coordinación PCF del estándar IEEE 802.11 en redes ad hoc.

Debido a la importancia de los clusters en el DPCF es necesario analizar con más detalle los mecanismos básicos asociados a la estructura de Master-

Slave. En el siguiente apartado, se puede consultar el funcionamiento del mecanismo de clustering utilizado en el DPCF.

4.2.2. Mecanismo de Clustering

La idea principal en la que se basa este mecanismo es la siguiente. Cualquier usuario que tiene paquetes de datos listos para ser transmitidos debe crear un cluster temporal siguiendo una estructura Master-Slave.

Cualquier usuario de la red DPCF puede trabajar en tres modos de operación; idle, Master y Slave. Los usuarios DPCF que no están asociados a ningún cluster trabajan en modo Idle. Un usuario se encuentra en este modo cuando no tiene datos a transmitir y cuando no ha detectado la actividad de ningún cluster. Los dos modos de operación restantes (Slave y Master) corresponden a los usuarios DPCF asociados a un cluster (ver Figura 14).

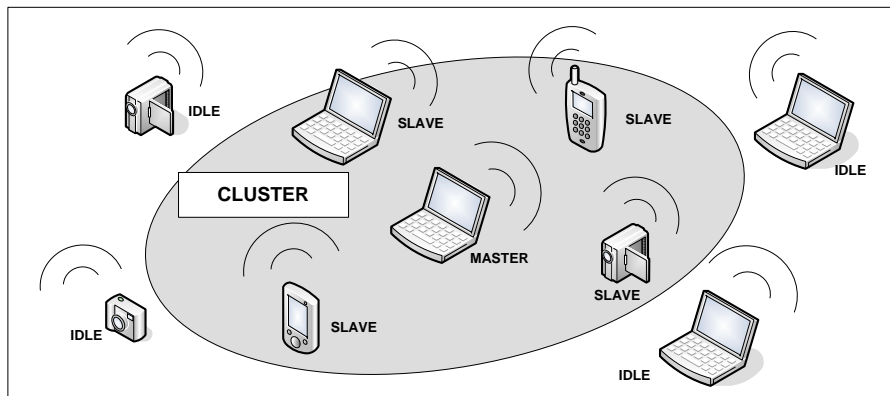


Figura 14. Red DPCF

Los usuarios en modo Master son los encargados de la gestión del acceso al medio en los clusters. Esto se debe a que dentro de cada cluster se aplica el método de acceso PCF del estándar, libre de contienda al canal. El PCF requiere de un dispositivo centralizado que administre el acceso de los usuarios asociados. Este es el papel del dispositivo en modo Master. Los usuarios en modo Slave son aquellos que se han asociado al cluster, o que han realizado la petición de inicio de un cluster a otro usuario.

Todos los usuarios DPCF deben realizar un **periodo de aprendizaje** inicial antes de crear una estructura Master-Slave en una red. Este periodo de aprendizaje consiste en operar en modo Idle durante un tiempo determinado. Durante ese periodo de tiempo, los usuarios aplican la función de coordinación DCF y todas las transmisiones de datos se realizan mediante el mecanismo de RTS/CTS descrito en el apartado 2.2.1.

En ese periodo, los usuarios DPCF deben “aprender” cuántos usuarios existen en la red y de qué tipo son. Para conseguirlo, utilizan un bit de la cabecera de los paquetes MAC RTS y CTS no utilizado en redes ad hoc. Un usuario que envía un paquete RTS ha de activar este bit para indicar al resto de usuarios de la red que es de tipo DPCF. De esta forma, cualquier usuario DPCF que detecte este campo activo conocerá que existe un usuario DPCF en su rango de transmisión.

A lo largo del periodo de aprendizaje los usuarios deben actualizar la información que tienen de la red. Hay que tener en cuenta que esta información corresponde a los usuarios que se encuentren en su rango de transmisión, puesto que únicamente serán capaces de recibir paquetes RTS y CTS de estos usuarios. La información se almacena en una “**tabla de vecinos**” (neighbor table) que contiene un registro de la red local que rodea a cada usuario. Esta tabla de vecinos permite a los usuarios DPCF que actúan como Master en un cluster optimizar el acceso al medio de los usuarios de ese cluster, por lo que debe actualizarse a lo largo del tiempo.

El periodo de aprendizaje debe durar lo suficiente como para que un usuario DPCF inicie un cluster cuando tiene suficiente información de los usuarios de la red. La duración de este periodo puede variar en función de la carga de tráfico y del número de usuarios existentes en la red, por lo que es necesario realizar un estudio previo sobre esta duración antes de configurar una red DPCF.

Pasado este tiempo de aprendizaje, los usuarios ya están listos para crear estructuras Master-Slave y actuar como Master. En el siguiente apartado se describe el proceso de inicialización de un cluster así como la asociación de un usuario DPCF a este.

4.2.3. Inicialización de un Cluster

Una vez finalizado el periodo de aprendizaje inicial, los usuarios DPCF solo pueden transmitir datos cuando estén asociados a un cluster.

Existe la posibilidad de que un usuario DPCF no detecte ningún cluster temporal activo en sus alrededores. Esto sucede cuando ningún usuario tiene datos a transmitir y opera en modo Idle o cuando existe algún cluster en la red pero el usuario no detecta su actividad debido a que está situado fuera de su rango de transmisión.

En esta situación, el usuario debe realizar una petición de clustering a otro usuario de la red. Hay que tener en cuenta que en una red DPCF, a diferencia del DQMAN, los usuarios que tienen datos a transmitir no actúan como Master de un cluster (ver 2.4) , sino que realizan una petición a otro usuario para que sea él el que actúe de Master y cree un cluster.

La petición se realiza mediante paquetes de control RTS. En la Figura 15 se puede observar de forma de gráfica el proceso de establecimiento del cluster.

La petición se realiza de la forma siguiente.

1. El usuario que quiere acceder al canal para transmitir datos debe enviar un paquete de control tipo RTS al destino de los datos. Antes de realizar la transmisión, aplica el mecanismo DCF del estándar definido en el apartado 2.2 para acceder al canal.
2. Cuando un usuario DPCF recibe un paquete RTS, comprueba que el móvil origen de la transmisión es usuario DPCF. Si es así, el destino

envía un paquete de BEACON a toda la red para indicar el inicio de un cluster.

3. Los usuarios que detecten este paquete pasan a trabajar en modo Slave. El Master de la red es el usuario que ha enviado el paquete de BEACON.

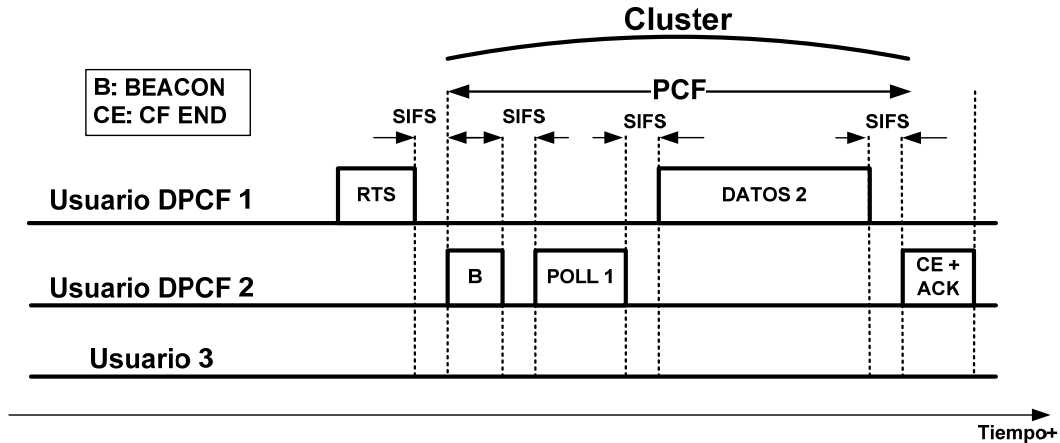


Figura 15. Inicialización de un cluster en DPCF

Sin embargo, también existe la posibilidad de que un usuario que tiene datos a transmitir detecte un cluster ya activo dentro de su rango de transmisión. En ese caso, el usuario puede asociarse directamente a ese cluster sin necesidad de realizar una petición para crear un nuevo cluster. La asociación a un cluster ya activo es posible gracias a los paquetes de BEACON que envían los Master de forma periódica de forma similar al AP en una red 802.11.

En ambos casos, y una vez creado el cluster, todos los usuarios (Master y Slave) asociados a el trabajan mediante la función de coordinación PCF y deben aplicar los mecanismos característicos de esta función de coordinación (combinación de paquetes, actualización del NAV...) definidos en el apartado 2.3.

El Master es el encargado de realizar el envío de polls a cada uno de los usuarios Slave de su cluster, para ofrecer la posibilidad de transmitir al canal. El primer paquete de POLL que envía tiene como destino el usuario DPCF que realizó la petición de cluster. Por ese motivo, en una red DPCF es de vital importancia que el usuario que actúa de Master tenga completamente actualizada la tabla de vecinos definida en el apartado 4.2.2. De lo contrario, el Master puede llegar a transmitir paquetes de POLL a usuarios desconectados, o incluso a usuarios que no sean DPCF. Esto puede provocar pérdidas de ancho de banda y puede provocar que el Master crea que hay inactividad en el canal y rompa el cluster.

Por lo tanto, es muy importante que esta tabla se mantenga actualizada para no perjudicar al mecanismo de clustering. La duración de un cluster puede variar en función de varios factores (uno de ellos es la no tener actualizada la tabla de vecinos). En el siguiente apartado se describe cual es la duración de un periodo de cluster y de qué factores depende su permanencia en el tiempo.

4.2.4. Duración de un Cluster

Los periodos de clustering se inician mediante paquetes de BEACON y finalizan con el envío de paquetes tipo CF END. De forma similar a la función PCF del estándar IEEE 802.11, estos paquetes de control pueden llevar información de reconocimiento (ACK) para el último destino que envía datos al Master antes de finalizar el periodo.

De forma similar al DQMAN, la duración temporal de un cluster en DPCF es variable y se mantiene en el tiempo hasta que se detecta que el conjunto de usuarios de ese cluster no tiene datos a transmitir, o cuando el cluster ha permanecido activo durante un tiempo máximo determinado. En la Figura 16 se puede consultar gráficamente un diagrama de estados de un usuario DPCF que actúa como Master en un cluster.

El Master es el encargado de fijar la duración temporal máxima del cluster, es decir, el MTO. El MTO se define como un número entero de paquetes de BEACON y se va decrementando en una unidad después de cada BEACON enviado. El número de BEACONs enviados durante cada cluster depende de la configuración de la red. El tiempo entre dos BEACON es un número entero de paquetes de POLL.

Sin embargo, la duración temporal de los clusters no siempre coincide con la del MTO. Los usuarios DPCF tienen un mecanismo de detección de inactividad que les permite finalizar un cluster antes de finalizar el MTO. Mediante este mecanismo se evita que un cluster permanezca activo más tiempo del necesario en la red.

Cuando un usuario DPCF actúa como Master, debe enviar paquetes de POLL de forma regular a los usuarios de su cluster. Según especifica el estándar IEEE 802.11 [2] cualquier usuario 802.11 compatible con la función PCF, cuando recibe un paquete de POLL, ha de contestar con un paquete de datos si tiene información a transmitir, o con un paquete de reconocimiento ACK si ha recibido datos de algún usuario o con un paquete tipo NULL. De esta forma, el Master puede detectar la actividad de todos los usuarios del cluster. Si en algún momento no recibe la contestación de un paquete de POLL, incrementa en una unidad el mecanismo de detección de inactividad. Cuando llega al límite, el Master entiende que no hay suficiente carga de tráfico en la red y finaliza el cluster.

Los usuarios DPCF que actúan como Slave en un cluster también utilizan este mecanismo de desasociación de un cluster cuando no reciben ningún tipo de paquete (POLL, DATOS o ACK) proveniente del Master. La desasociación de un usuario en un cluster no provoca la finalización del cluster, pero si el conjunto de usuarios de un cluster se desasocia de un cluster, el Master debe finalizar también el cluster.

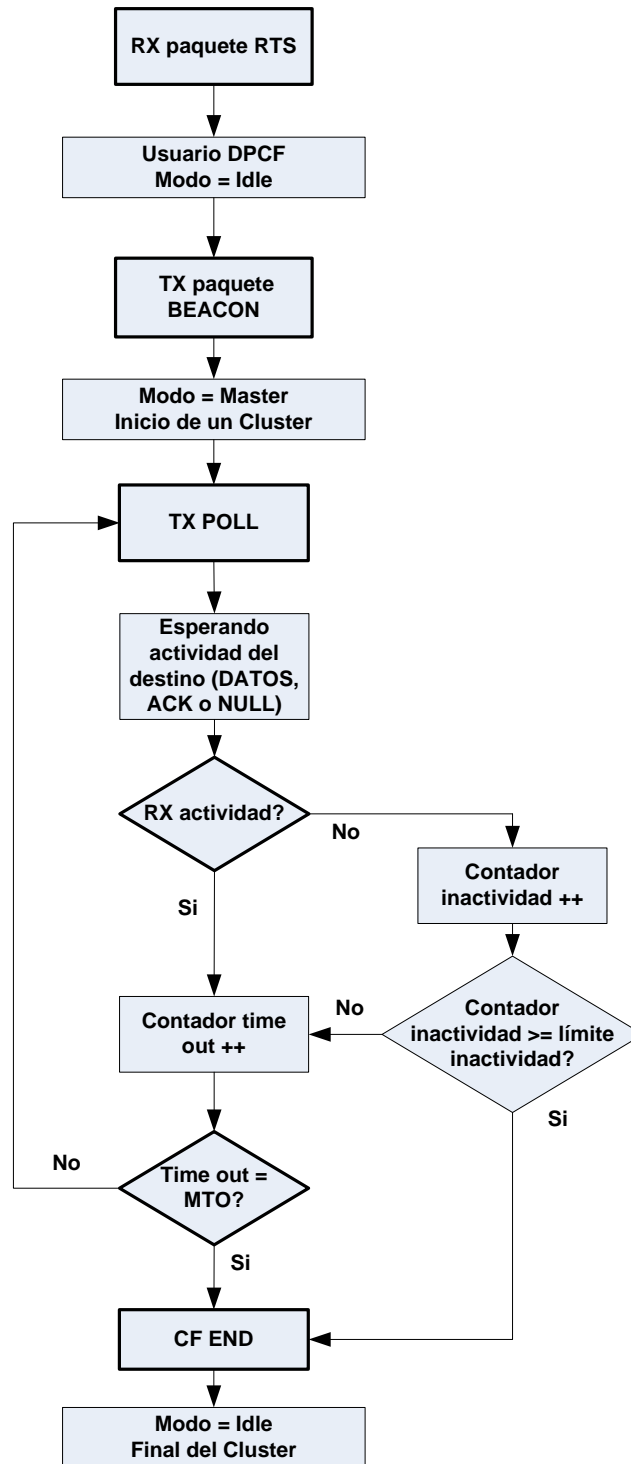


Figura 16. Diagrama de estados DPCF

4.3. Evaluación del rendimiento de DPCF

4.3.1. Definición del entorno de simulación

Para evaluar el rendimiento del protocolo DPCF se han realizado simulaciones en MACSWIN. Se ha evaluado el throughput y la media del retardo de transmisión de la red frente a diferentes cargas de tráfico ofrecidas a una red en la que todos los usuarios están en un mismo rango de transmisión (entorno

single hop) y donde sólo se han tenido en cuenta las pérdidas de propagación del canal.

Se han creado tres escenarios de simulación aislados: DCF, PCF y DPCF. Se entiende por escenario aislado aquel donde todos los usuarios de la red implementan el mismo protocolo y no existe ninguna interferencia exterior a esta red. Los tres escenarios representan:

- 1) **DCF**: red estándar 802.11 en la que únicamente se utiliza la función DCF. En esta red, los usuarios aplican el mecanismo de CSMA/CA para conseguir acceder al canal y realizar transmisiones de datos. Además, se utiliza el mecanismo de reserva de recursos mediante los paquetes RTS y CTS.
- 2) **PCF**: red 802.11 en la que únicamente se aplica la función PCF, pero en modo punto a punto. En esta red, los usuarios dependen de la gestión del medio de un AP. Sin embargo, no es necesario canalizar el tráfico de la red por el AP y los usuarios pueden transmitir datos a cualquier destino de la red de forma directa.
- 3) **DPCF**: red ad hoc aislada de usuarios inalámbricos DPCF. En este escenario, los usuarios utilizan las reglas del protocolo MAC DPCF definidas en el apartado 4.2.

Para limitar la gran cantidad de posibles entornos de simulación se han fijado los siguientes parámetros para todos los escenarios:

1. La tasa de transmisión para los paquetes de control siempre se transmiten a la mínima velocidad de transmisión (6 Mbps) ya que se intenta que sufran el mínimo número de errores posibles al utilizar la codificación de canal más conservadora. La transmisión de datos se realiza a 54 Mbps. Se ha supuesto que los usuarios están lo suficientemente cerca como para que este valor sea el más alto. El uso de velocidades de transmisión menores (24 o 6 Mbps) únicamente cambia el valor absoluto de los resultados, pero no modifica las conclusiones que se pueden extraer.
2. EL número de usuarios en la red es de 20.
3. La longitud de los paquetes de datos se ha fijado a 1500 bytes. Hay que recordar que los paquetes de datos pueden ser de longitud variable entre 0 y 2312 bytes [2]).
4. La gestión de la cola de polling se realiza mediante el mecanismo de Round Robin debido a que el estándar IEEE 802.11 no define ningún tipo de mecanismo concreto. Mediante este método, el AP envía paquetes de POLL de forma cíclica a los usuarios de la red sin aplicar ningún tipo de prioridad.

Todas las redes están formadas por 20 usuarios en total. Los parámetros referentes a la configuración de la red DPCF son los siguientes; 19 paquetes

de POLL entre dos BEACON, MTO = 3. Hay que recordar que el MTO es el número de paquetes de BEACON dentro de un cluster, y que el número de paquetes de POLL entre dos BEACON debe ser un número múltiplo del número de usuarios DPCF en la red menos uno.

El modelo de generación de tráfico es constante, es decir, la carga total de tráfico generada en la red se distribuye de manera uniforme entre todos los usuarios. Además, todos los usuarios pueden generar tráfico a cualquier destino de la red. En las simulaciones únicamente se tiene en cuenta las pérdidas de propagación del canal. Sin embargo, estos parámetros son despreciables debido a que las redes simuladas son de tipo single hop.

El resto de parámetros referentes a las capas MAC y PHY de las simulaciones se han fijado de acuerdo al estándar 802.11g. Se pueden consultar en la Tabla 3. En el siguiente apartado se presentan los resultados de las simulaciones. El rendimiento del escenario DPCF se compara con los dos escenarios estándar IEEE 802.11.

Tabla 3. Parámetros de simulación

Parámetro	Valor
Cabecera MAC	34 bytes
Preámbulo PHY	96 us
Longitud paquetes datos	1500 bytes
Longitud paquetes control (CTS y ACK)	14 bytes
Longitud paquetes control (RTS, BEACON, CF END y POLL)	20 bytes
Velocidad de TX de datos	54 Mbps
Velocidad de TX de control	6 Mbps
SIFS	10 us
PIFS	30 us
DIFS	50 us
Ventana de contienda mínima	16
Ventana de contienda máxima	256

4.3.2. Evaluación de los resultados

En la Figura 17 se muestra el throughput total de las tres redes simuladas en función de diferentes cargas de tráfico. Tal y como se esperaba, el throughput total de la red DPCF supera el de las redes DCF y PCF.

El throughput total es igual en los tres casos para cargas bajas de tráfico (<10 Mbps). La pendiente de la curva en esta zona es 1, es decir, los usuarios de la red son capaces de transmitir todo el tráfico que generan en la capa MAC directamente sin necesidad de utilizar las colas de transmisión para reservar paquetes.

Sin embargo, a medida que la carga de tráfico ofrecida a la red aumenta, el throughput total se satura en un valor constante. Cada protocolo se satura en un punto de carga de tráfico diferente. El protocolo capaz de soportar una mayor carga de tráfico es el DPCF, seguido del PCF y del DCF, respectivamente.

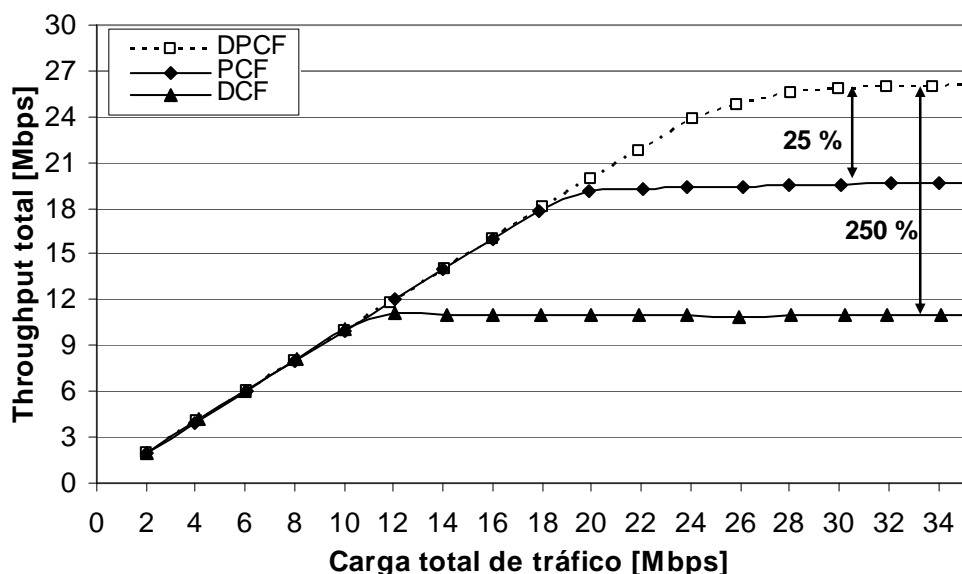


Figura 17. Comparación de throughput de los terminales DPCF, PCF y DCF

El hecho de que el throughput se mantenga aproximadamente constante por encima del punto de saturación indica que los tres protocolos son bastante robustos a la congestión de la red, y por lo tanto, podrían absorber puntuales picos de tráfico.

La red PCF consigue cursar el doble tráfico que la red DCF (10 Mbps frente a 24 Mbps). Esto se debe en parte, a que el protocolo PCF está diseñado para trabajar en entornos donde existe un número relativamente elevado de usuarios y en entornos con cargas de tráfico elevadas. Además, en la red PCF no existen colisiones ya que durante toda la simulación, el acceso al medio es coordinado por un AP.

La mejora de rendimiento del DPCF respecto al PCF no es tan evidente. Para comprender con más detalle el por qué del mejor rendimiento de la red DPCF frente a la red PCF, es interesante observar el comportamiento del DPCF y del PCF desde otra perspectiva.

La Figura 18 muestra la probabilidad global de transmitir datos en cada TXOP. Los resultados muestran las oportunidades utilizadas por el conjunto global de dispositivos de las dos redes, incluyendo el AP en la red 802.11. Hay que tener en cuenta que en una red donde se utiliza la función PCF es posible tener oportunidad de acceso al medio (cuando se recibe o se envía un POLL) y no utilizarla para transmitir datos, sino simplemente información de control (ACK, POLL o NULL). Los resultados se muestran en función de la carga total de tráfico de la red. La red DPCF consigue mejorar de forma considerable la probabilidad de transmisión de la red PCF en un 45 % para cargas altas de tráfico (más de 20 Mbps).

Cuando la carga de tráfico es baja, ambas redes se comportan de forma similar. Sin embargo, para cargas elevadas de tráfico, se puede observar como la red DPCF incrementa la probabilidad de transmisión en un 99% mientras que la red PCF se satura en un 55%. Es decir, cuando la carga de tráfico ofrecida a

la red es elevada, los usuarios DPCF consiguen transmitir datos prácticamente en la totalidad de oportunidades de acceder al medio de las que disponen. Cuanto mayor sea la probabilidad de usar una txop mayor será la eficiencia del protocolo al no desaprovechar el overhead asociado a cada POLL.

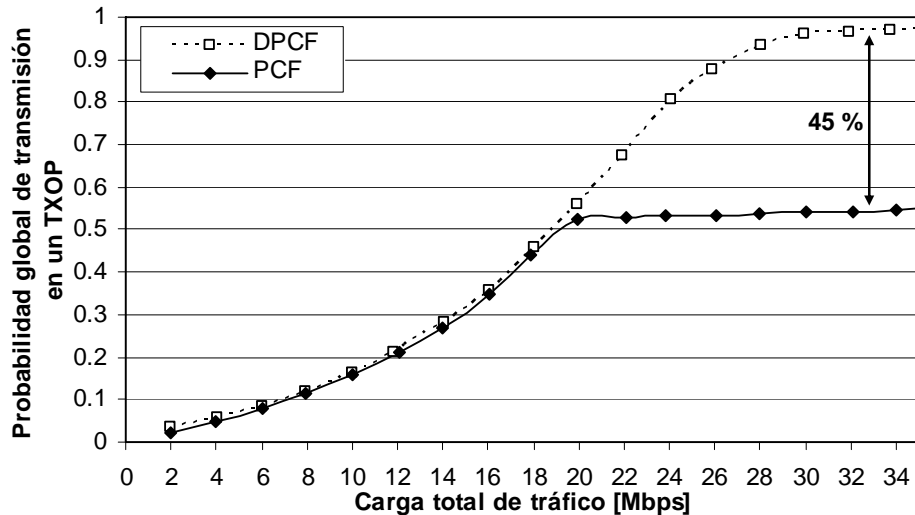


Figura 18. Probabilidad global de transmitir datos al canal en un "Transmission Opportunity" (TXOP)

La justificación de la menor probabilidad transmisión en un TXOP en la red PCF, se debe básicamente a una descompensación de las oportunidades de transmisión en la red entre el AP y el resto de usuarios. La Figura 19 muestra el número de TXOPS por segundo de los usuarios PCF y DPCF en función de la carga de tráfico total ofrecida a la red. Cuando la carga de tráfico es baja, los usuarios de red PCF no tienen datos a transmitir, y el AP envía un número de paquetes de POLL elevado a la red (la mayoría de TXOPS no se utilizan para acceder al canal). Cuando la carga de tráfico en la red empieza a ser elevada, todos los usuarios envían datos cuando reciben un POLL y las oportunidades de acceder al canal de todos los usuarios de la red y del AP se mantienen constantes. Tal y como era de esperar, el AP es el dispositivo de la red PCF que más oportunidades tiene de acceder al canal. De hecho, el número de oportunidades que tiene es el mismo que la suma de oportunidades de todos los usuarios de esta red. Esto se debe a que puede añadir datos en cada paquete de POLL enviado. Sin embargo, este exceso de oportunidades provoca que el comportamiento del AP sea mucho mejor al del resto de usuarios de la red. Por lo tanto, las cargas de tráfico que podrá soportar serán mucho más elevadas en un AP que en un usuario DPCF.

En la Figura 20 se muestra la probabilidad de transmitir datos al canal en una TXOP por usuario en las redes PCF y DPCF. Se puede observar que a medida que aumenta el tráfico total ofrecido a la red aumenta la probabilidad de uso de oportunidades de transmisión de los usuarios y del AP.

Por un lado, cuando la carga de tráfico total de la red es alta, los usuarios PCF utilizan todas las oportunidades disponibles para transmitir al canal. En este punto, los usuarios de la red PCF no son capaces de soportar todo el tráfico que generan en la capa MAC y empiezan a llenar las colas de transmisión de

paquetes de datos. El retardo medio de transmisión aumenta y el throughput total de la red se estabiliza a un valor constante.

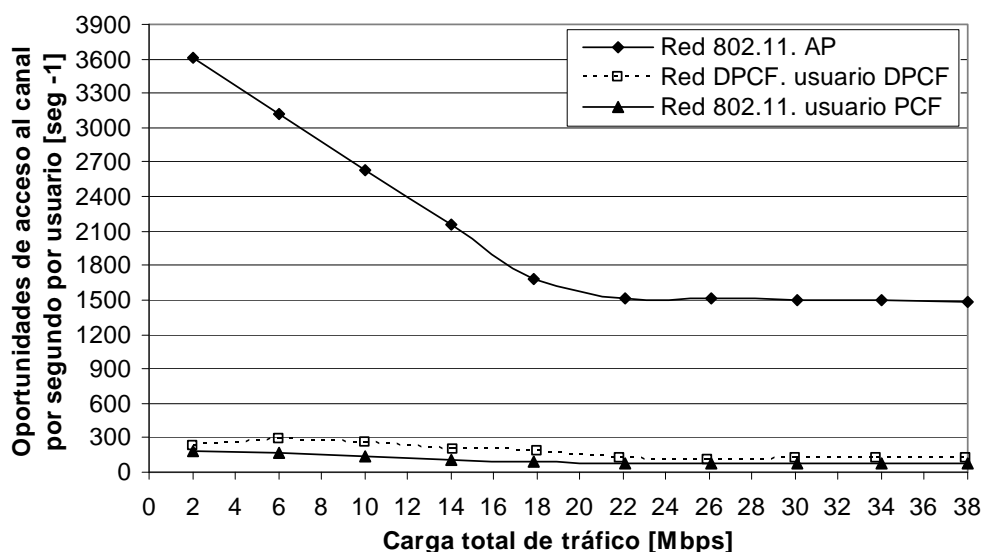


Figura 19. Oportunidades de acceder al canal por segundo por usuario del AP y valor medio de oportunidades de acceder al canal de los usuarios DCF y PCF.

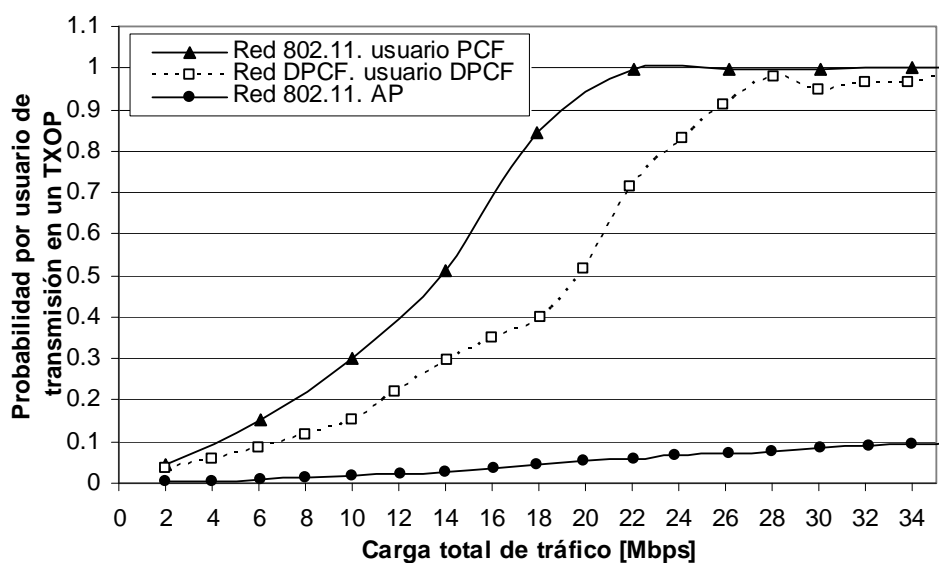


Figura 20. Probabilidad de transmitir datos al canal en un "Transmission Opportunity" (TXOP) por usuario.

Por otro lado, el AP nunca llega a utilizar el total de oportunidades disponibles para esos valores de tráfico total ofrecido a la red. Esta situación provoca, por un lado, que el AP desaproveche oportunidades de transmisión y por el otro lado, los usuarios pierdan paquetes de datos a causa del desbordamiento de sus colas de transmisión.

En redes DPCF, se utiliza la función PCF dentro de los clusters, y el Master que actúa de forma similar a un AP, es un usuario más. Por lo tanto, la descompensación de oportunidades en la red puede hacer que el rendimiento de los usuarios en modo master sea mucho mayor que el de otros. Aunque esto constituye por sí solo un mecanismo para incentivar a los usuarios a

asumir la responsabilidad de operar en modo Master (a pesar del consumo extra de energía que conlleva transmitir toda la señalización de control), puede contribuir a un acceso muy desigual al canal. Sin embargo, el hecho de que el clustering de DPCF sea dinámico y aleatorio, reparte de manera homogénea entre todos los usuarios de la red la responsabilidad de ser Master. De esta forma, el número de oportunidades de la red se distribuye uniformemente entre todos los usuarios de la red, aumentando por tanto el rendimiento global de la red DPCF.

En la Figura 21 se puede ver con más detalle el aumento del valor medio de oportunidades de un usuario DPCF respecto a un usuario PCF.

Este aumento de oportunidades se debe a que en una red DPCF cada usuario opera durante un periodo de tiempo como Master. Un Master actúa de forma similar a un AP en una red PCF. Por lo tanto, el número de oportunidades que tiene ese usuario aumenta durante ese periodo.

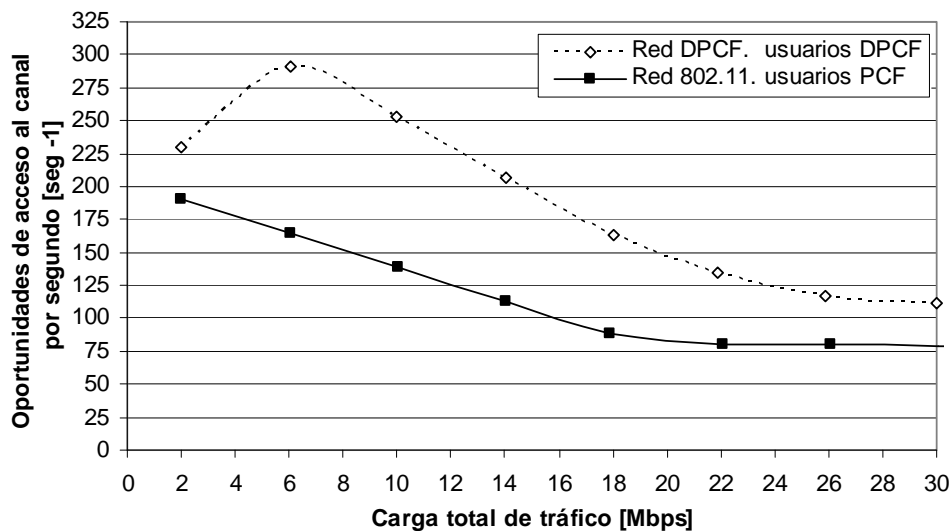


Figura 21. Valor medio de oportunidades de acceder al canal por segundo por usuario.

A medida que aumenta la carga de tráfico en la red, los usuarios que operan en modo Slave empiezan a sufrir saturación de forma similar a los usuarios PCF. En ese momento, las colas de transmisión de los usuarios DPCF se empiezan a llenar de paquetes de datos y la media del retardo de transmisión aumenta. Cuando esto sucede, el usuario debe intentar operar como Master dentro de un cluster. Si lo consigue antes de que la cola se llene por completo, será capaz de transmitir un mayor volumen de tráfico que en el modo Slave y podrá vaciar su cola de transmisión. Por ese motivo, es necesario que todos los usuarios trabajen de Master de forma periódica. De esta forma, se consigue que en media, la red sea capaz de soportar volúmenes de tráfico mayores a los de la red PCF.

En las simulaciones de este apartado se ha utilizado el método de Round Robin para gestionar la cola de polling. Se asume que cada usuario de la red conoce al resto de usuarios que conforman esa red. Hay que recordar que la tabla de vecinos de los usuarios DPCF ha de mantenerse actualizada para que

la eficiencia de la gestión de la cola de polling en cada cluster no disminuya. De esta forma, un Master envía paquetes de POLL de forma cíclica a los usuarios que tiene registrados en su tabla.

Los resultados muestran que el mecanismo de round robin no es el más adecuado para este tipo de redes ya que desaprovecha gran parte de los recursos disponibles de la red. El rendimiento del protocolo DPCF y del PCF puede aumentar si se utiliza un scheduler que consiga mejorar la gestión de los recursos en estos protocolos.

El retardo de transmisión para las tres redes se puede observar en la Figura 22. La media del retardo en la red DPCF es menor que cualquiera de las dos redes estándar simuladas. Se puede observar que el retardo medio de transmisión de las redes PCF o DPCF para cargas bajas de tráfico es mayor al de la red DCF. A pesar de que en estas dos redes se utiliza el mecanismo de polling y no existen colisiones, las transmisiones sufren mayores retardos de transmisión. Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, el mecanismo de PCF definido en el estándar IEEE 802.11 ofrece buenos rendimientos para redes con altos usuarios y para cargas elevadas de tráfico. Sin embargo, para cargas bajas de tráfico el DCF es capaz de disminuir el retardo de transmisión de los paquetes.

Por último, se puede comprobar que para cargas altas de tráfico, el retardo de transmisión de la red DPCF supera al de las dos funciones de coordinación (DCF y PCF). De esta forma, es posible observar gráficamente como el protocolo DPCF consigue mejorar tanto en throughput total como en retardo medio de transmisión a los protocolos MAC estándar 802.11.

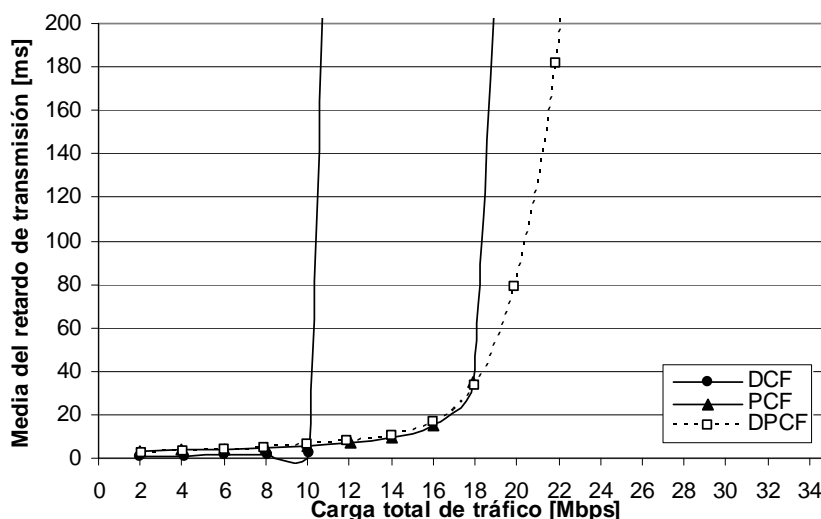


Figura 22. Comparación de la media del retardo de transmisión de las 3 redes (DPCF, PCF y DCF)

4.3.3. Conclusiones

Tal y como se ha podido observar, el rendimiento del DPCF mejora de forma considerable al de una red 802.11, que utiliza cualquiera de las dos funciones de coordinación (PCF o DCF). El aumento de rendimiento se debe, en gran parte, a la compensación de las oportunidades de transmisión entre todos los usuarios de la red DPCF.

CAPÍTULO 5. INTEGRACIÓN DEL DPCF EN REDES 802.11

5.1. Introducción

En el capítulo anterior se ha comprobado mediante simulaciones que el DPCF consigue aumentar el rendimiento de las redes ad hoc 802.11 utilizando mecanismos de acceso al medio más eficientes que los utilizados por los terminales estándar. Por lo tanto, la introducción en el mercado de nuevos terminales que llevasen implementado este protocolo podría aumentar la eficiencia de las redes actuales.

Sin embargo, es poco probable que la introducción de un nuevo terminal en el mercado tenga un índice de acogida tan grande como para que se sustituya la totalidad de la tecnología implantada hasta ahora. Por ese motivo, parece lógico pensar que un nuevo dispositivo debe ser capaz de coexistir con la tecnología actual. Además, debe intercomunicarse con estos dispositivos para que su integración sea completa.

La finalidad de este capítulo es evaluar mediante simulaciones las consecuencias de una posible introducción en el mercado de un nuevo terminal dual para redes ad hoc inalámbricas.

El capítulo se estructura en dos partes. En la primera sección, se realiza una descripción de la coexistencia entre terminales DPCF y 802.11 en una misma red y se definen los mecanismos necesarios para conseguir que los dos tipos de usuarios se intercomuniquen. En la segunda sección se realiza un estudio del comportamiento de una red mixta (usuarios DPCF y 802.11) para evaluar la coexistencia mediante simulaciones por ordenador.

5.2. Descripción del entorno mixto

5.2.1. Coexistencia de terminales 802.11 y DPCF

Los usuarios DPCF son terminales duales que pueden ejecutar tanto el protocolo DPCF como la función DCF del protocolo 802.11. Esto permite que puedan coexistir con usuarios 802.11 y que sean capaces de intercomunicarse con ellos.

Cuando un usuario DPCF inicia un cluster en la red, los terminales DPCF se comunican entre sí mediante la función PCF. Durante ese periodo, también pueden enviar datos a los usuarios estándar 802.11, pero estos solo son capaces de responder con un paquete de reconocimiento (ACK), puesto que durante un periodo de PCF, actualizan su vector NAV y no pueden acceder al canal (no pueden interpretar los POLLS).

Si no hay ningún cluster en la red, los usuarios DPCF pueden comunicarse con los usuarios estándar 802.11 mediante la función DCF. Esto permite que existan comunicaciones entre usuarios duales y estándar.

Los usuarios duales utilizan un campo de la cabecera MAC en los paquetes RTS y CTS no utilizado en redes ad hoc para indicar que son terminales duales y que pueden ejecutar tanto la función DCF como la función PCF. De esta forma, cuando un usuario DPCF tiene datos que transmitir a otro usuario dual, envía un paquete RTS en el que indica que es dual.

Si el receptor también es dual, interpreta el RTS y envía un paquete BEACON para iniciar un periodo de cluster.

Debido a que los usuarios estándar 802.11 que implementan la función DCF no entienden los paquetes tipo BEACON, o los paquetes tipo CF END (necesarios para iniciar y finalizar un cluster) no serán capaces de actualizar su NAV durante un cluster y por lo tanto pueden intentar acceder al canal y provocar una colisión. Por lo tanto, en un entorno mixto es necesario sustituir los paquetes de BEACON y CF END por paquetes de control que sean capaces de transmitir la misma información a los usuarios duales y que sean conocidos por los usuarios 802.11.

La solución es modificar parte del contenido de los paquetes de control CTS de la función DCF. Estos paquetes contienen información inutilizada en redes ad hoc por los usuarios estándar 802.11. En concreto, los bits B8 y B9 del campo *Frame Control* (FC) solo se utilizan en redes en modo infraestructura.

Se ha utilizado uno de estos bits para crear un **Dual Flag** que indica a los usuarios duales diferenciar el CTS modificado del resto de CTS básicos. Los usuarios estándar ignoran este flag.

Cuando un usuario DPCF detecta un Dual Flag activo, interpreta el campo *Duration Field* para conocer el tipo de paquete que se ha enviado (ver Figura 23). Si este campo contiene un valor nulo, corresponde a un paquete tipo CF END. Por el contrario, corresponde a un paquete tipo BEACON e indica la duración temporal entre dos paquetes de BEACON (CTS modificados). El *Duration Field* también es útil para que los usuarios estándar actualicen su NAV durante un periodo de cluster.

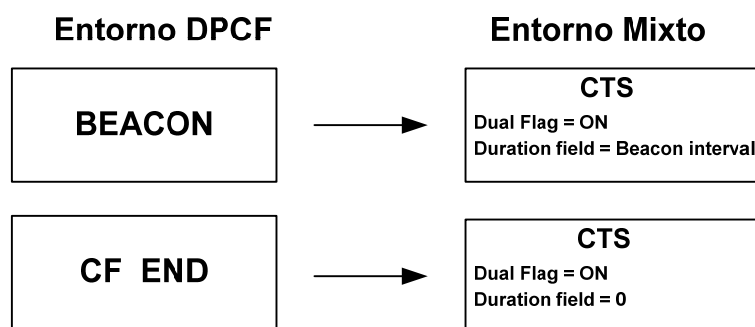


Figura 23. Sustitución paquetes BEACON y CF END en entorno mixto

Si el receptor del paquete RTS no es dual, o el RTS indica que el origen es un usuario estándar (dual flag desactivado), el terminal responde mediante un paquete CTS básico y la comunicación se realiza mediante la función DCF. En la Figura 24 se puede observar un diagrama de estados de un usuario en un entorno mixto que recibe un paquete CTS.

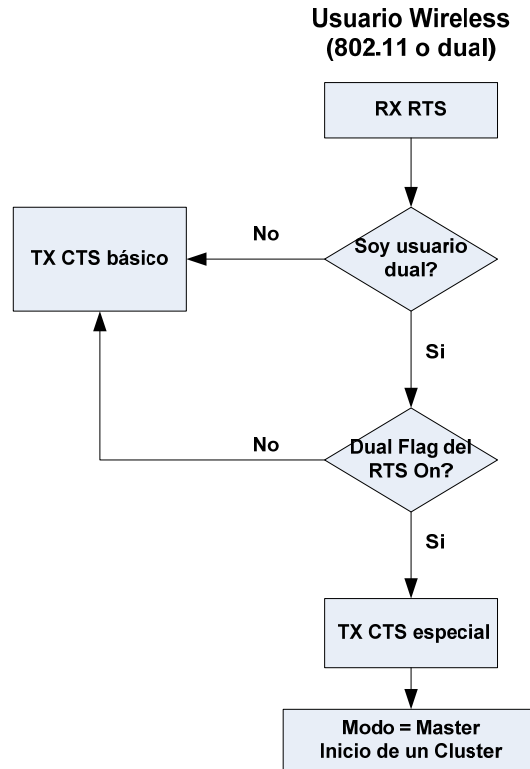


Figura 24. Diagrama de estados de un usuario que recibe un CTS

Para que los periodos de cluster no perjudiquen a los usuarios 802.11, se aplica un periodo temporal después de cada cluster en el que todos los usuarios, duales y estándar, deben operar en modo DCF (ver Figura 25). Este periodo temporal se denomina **ECT** (Equivalent Cluster Time) y es el mínimo tiempo que debe transcurrir después de cada cluster para que se transmita, en media, el mismo número de paquetes que en el cluster anterior. De esta forma, se consigue que la red sea más justa con los terminales 802.11 y no sufran de bloqueo de acceso al canal en entornos de muy alta carga de tráfico.

Cuando finaliza un cluster, todos los usuarios (tanto DPCF como 802.11) deben aplicar una ventana de Backoff después de un tiempo de espera DIFS aunque no tengan datos a transmitir. Esto permite reducir la probabilidad de colisión en la red después de cada cluster.

Este periodo de DCF también permite a los usuarios duales detectar qué tipo de terminales en la red son duales y cuales no. De esta forma, durante los periodos de cluster solo se enviará POLL a los usuarios DPCF y se evitan pérdidas de ancho de banda.

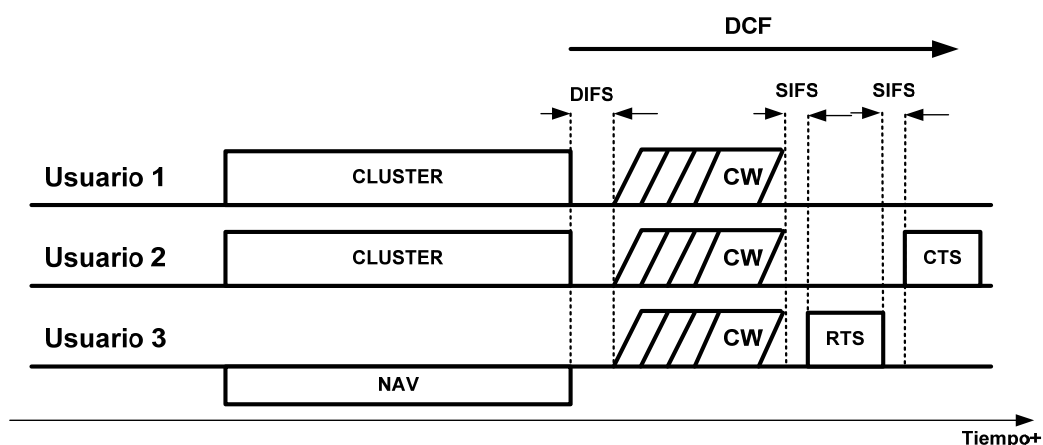


Figura 25. Periodos de tiempo DCF y PCF en DPCF

5.3. Evaluación del rendimiento de la red Mixta

5.3.1. Definición del entorno de simulación

Para estudiar la coexistencia de terminales DPCF y 802.11 se ha creado un escenario mixto en el simulador MACSWIN. El escenario corresponde a una red inalámbrica ad hoc de 20 usuarios en total. Todos los usuarios de la red son capaces de realizar transmisiones de forma directa entre otro usuario de la red (single hop). Solo se han considerado pérdidas de propagación del canal.

5 de los 20 usuarios son usuarios DPCF duales, es decir, son capaces de utilizar el protocolo DPCF y el la función DCF. El resto de usuarios son usuarios estándar 802.11 y solo pueden ejecutar la función DCF. En ambos conjuntos, se utiliza el mecanismo de RTS/CTS durante los periodos de DCF.

Los parámetros referentes a la configuración de los usuarios duales DPFC de la red de son los siguientes; 16 paquetes de POLL entre dos BEACON, MTO=4. Hay que recordar que el MTO es el número de paquetes de BEACON dentro de un cluster, y que el número de paquetes de POLL entre dos BEACON debe ser un número múltiplo del número de usuarios DPCF en la red menos uno.

El resto de parámetros referentes a las capas MAC y PHY de las simulaciones se han fijado de acuerdo a los parámetros definidos en el en el apartado 4.3.1 . En el siguiente apartado se presentan los resultados de la red mixta, y se comparan con los de una red DPCF y los de una red 802.11 para facilitar la comprensión.

5.3.2. Evaluación de los resultados

La Figura 26 muestra el throughput total de la red simulada en función de las diferentes cargas de tráfico. Tal y como era de esperar, el throughput total del entorno mixto se mantiene entre el throughput total de las dos redes básicas (DCF y 802.11).

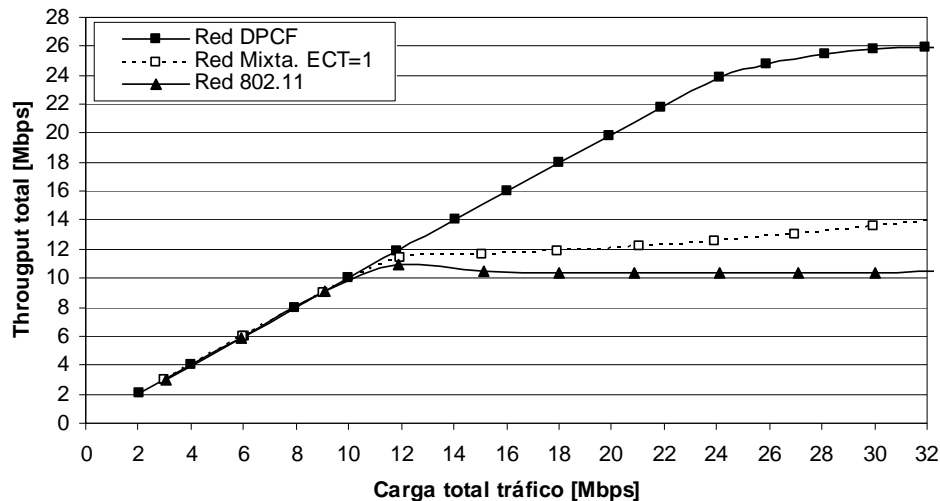


Figura 26. Throughput total de las redes Mixta y 802.11

Este resultado es lógico ya que en el entorno mixto, los usuarios realizan transmisiones de forma alternada mediante los dos protocolos (DCF y DPCF). Además, se puede observar como afecta la duración del periodo DCF que se aplica después de cada cluster.

Cuando la carga de tráfico es baja, el throughput total de la red mixta para es similar al de una red 802.11. En esta situación todos los usuarios de la red son capaces de transmitir los paquetes generados y las colas de transmisión se mantienen vacías. Por lo tanto, los periodos DCF después de cada cluster no afectan al throughput total de la red cuando no hay mucho tráfico que cursar.

A medida que aumenta la carga de tráfico, los periodos de cluster de los usuarios DPCF empiezan a ser más largos, y provocan que el throughput total de la red se sature y su aumento sea menos pronunciado. La red mixta se satura en un punto de carga de tráfico similar al del 802.11. Sin embargo, a medida que la carga de tráfico aumenta, el throughput total que es capaz de soportar la red mixta es mayor al de la red 802.11 y menor al de la red DPCF básica. Por lo tanto, se puede asegurar que en un entorno mixto de usuarios DPCF y 802.11, el throughput total de la red siempre será igual o superior al de una red 802.11, y por lo tanto, es posible la coexistencia de terminales DPCF y 802.11 sin perjudicar al comportamiento global de la red.

Es interesante observar los valores de throughput que son capaces de soportar por separado los usuarios 802.11 y DPCF en este entorno. Las Figura 27 y Figura 28 muestran el throughput total de cada conjunto (802.11 y DPCF) en función de la carga de tráfico total ofrecida por la red. Se puede observar que, la introducción de usuarios DPCF en un entorno estándar 802.11 provoca un comportamiento distinto en función del tipo de usuario que se analiza.

Ambos conjuntos se comportan igual frente a cargas bajas de tráfico. Los resultados muestran que tanto los 802.11 como los DPCF son capaces de transmitir la carga total de tráfico que generan. Sin embargo, para cargas de tráfico elevadas, los dos conjuntos se comportan de forma opuesta. Se puede observar como el aumento del período DCF de los usuarios DPCF modifica el

throughput total de la red pero también el throughput individual de cada conjunto.

Por un lado, los usuarios 802.11 aumentan el throughput a medida que el periodo de DCF (ECT) es mayor. Esto sucede porque los usuarios DPCF transmiten durante más tiempo en DCF, y por lo tanto, los usuarios estándar tienen más oportunidades de acceder al canal. Además, se puede observar que el valor de throughput del conjunto de usuarios 802.11 para cargas de tráfico elevadas tiende a un valor constante y en ningún caso llega a ser cero. Esto se debe a los periodos de DCF mínimos aplicados después de cada cluster. Por lo tanto, estos usuarios podrán soportar ráfagas de datos cuando la red esté saturada, a pesar de que los usuarios DPCF apliquen durante más tiempo periodos de cluster.

Por otro lado, el throughput del conjunto de usuarios DPCF disminuye a medida que aumentan de los periodos de DCF (ECT). Sin embargo esta disminución de la mejora de throughput siempre se mantiene por encima del throughput que obtendría el mismo número de usuarios en estas condiciones si solo implementasen la función DCF, es decir, se comportaran como usuarios estándar 802.11. Esto se debe a que los usuarios DPCF tienen menos oportunidades de generar clusters y tienden a operar en modo DCF.

Por lo tanto, el periodo DCF después de cada cluster se convierte en un parámetro a tener en cuenta en la configuración de una red mixta. El valor óptimo de este parámetro es variable y depende tanto del número de usuarios de la red como de la capacidad de carga que ha de soportar cada conjunto de terminales. A causa de esto, aparece un compromiso entre el throughput total de la red (aumenta cuanto mayor son los periodos de DCF) y el rendimiento de los usuarios estándar (aumenta cuanto mayor sea el periodo de DCF).

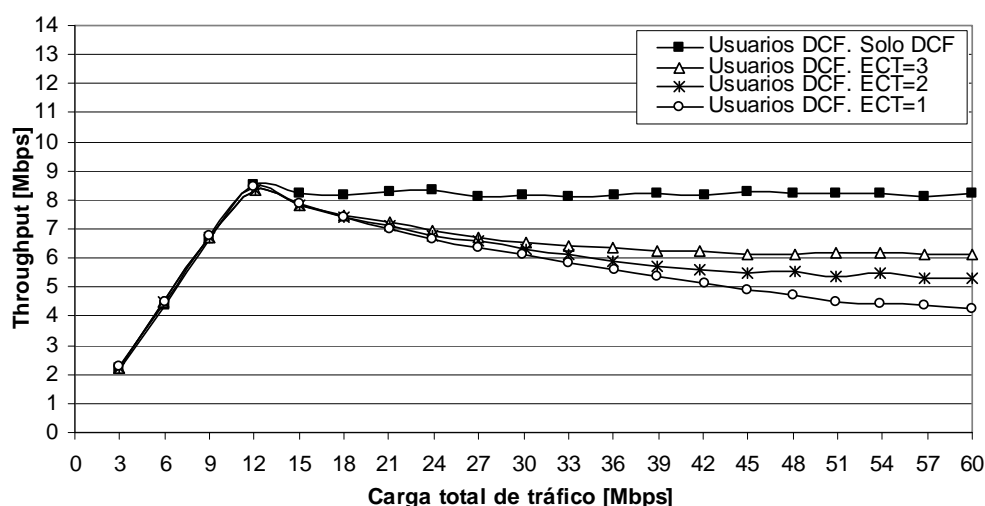


Figura 27. Throughput del conjunto de usuarios 802.11

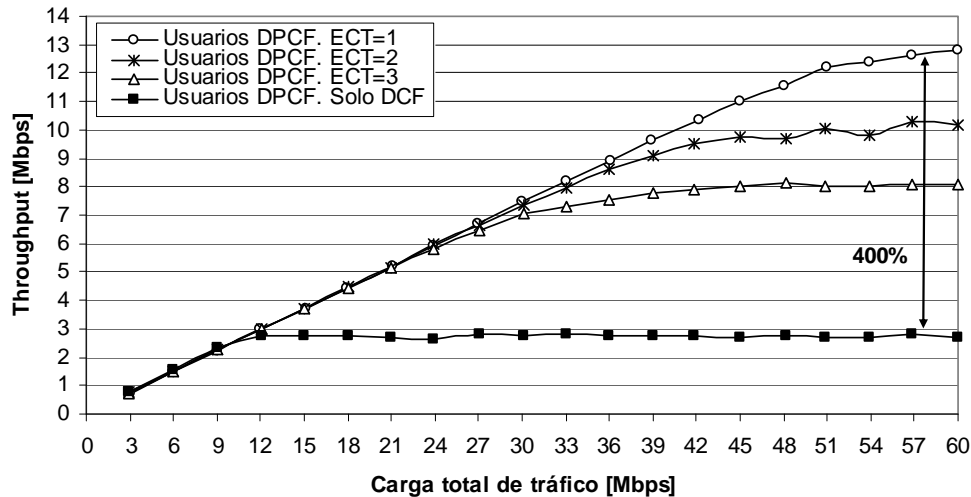


Figura 28. Throughput del conjunto de usuarios DPCF

Por último, en la Figura 29 se muestra la media del retardo de transmisión global de la red en función de distintas cargas de tráfico. Para cargas de tráfico bajas, el retardo de transmisión de la red mixta es muy similar al de una red 802.11 y mejora el rendimiento de una red DPCF. Esto se debe a que los usuarios transmiten la mayoría del tiempo mediante la función DCF, y tal y como se ha podido observar en el capítulo 5, el retardo de transmisión de esta función mejora el de una red DPCF.

Por otro lado, para cargas de tráfico altas, el retardo del entorno mixto es ligeramente inferior al de una red 802.11. Esta disminución de rendimiento se debe a que no todos los terminales estándar de la red implementan la función PCF definida en el estándar IEEE 802.11.

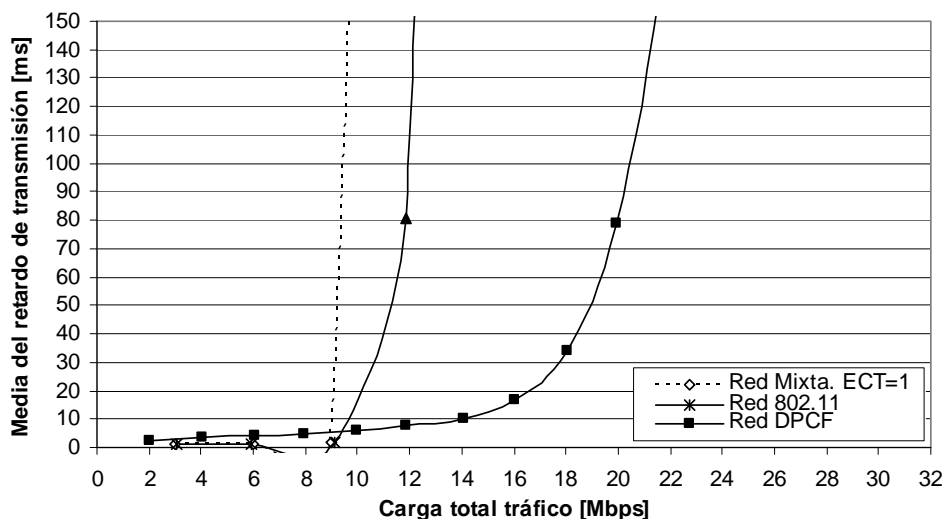


Figura 29. Media del retardo de TX de las redes Mixta, DPCF y 802.11

Cuando el conjunto de usuarios DPCF quiere transmitir información, se crean clusters temporales en la red. Los clusters se inician mediante el envío de un BEACON, por lo que todos los usuarios 802.11 deben actualizar su vector NAV para evitar colisiones durante el periodo PCF.

Esto provoca que los usuarios estándar no puedan acceder al canal y por lo tanto no puedan transmitir datos. Sin embargo, deben de ser capaces de responder los paquetes de datos que reciben.

5.3.3. Conclusiones

Como conclusiones de este apartado, se puede observar que la introducción en un entorno estándar de usuarios DPCF es posible gracias a que estos terminales son duales y pueden comunicarse tanto con usuarios estándar como con usuarios DPCF. El rendimiento global de la red mixta es ligeramente superior al de una red estándar 802.11 e inferior al de una red DPCF. Los usuarios DPCF son capaces de aumentar hasta un 400% el throughput total con respecto al mismo número de usuarios 802.11 sin perjudicar al rendimiento global de la red.

CAPITULO 6. EVALUACIÓN DEL DPCF EN ENTORNOS MULTI HOP

6.1. Introducción y motivaciones

Debido a la naturaleza multi hop de las redes ad hoc inalámbricas por la que no todos los usuarios están en un mismo rango de transmisión, es necesario estudiar el comportamiento del DPCF en un entorno que simule estas redes. En estos entornos los paquetes dan varios saltos a través de los usuarios de la red, que actúan como enrutadores, hasta llegar a su destino.

El análisis de protocolos en redes multi hop supone un gran reto debido al gran número de variables y parámetros que se interrelacionan. La alternativa más razonable es analizar escenario por escenario, buscando el rendimiento de un determinado protocolo para una aplicación específica. Por ese motivo, este capítulo no pretende evaluar una red DPCF en un entorno multi hop general, sino que la idea es crear un escenario de simulación específico. El objetivo es validar la operación del protocolo en entornos multi hop, sabiendo de antemano que cada escenario específico requiere de su optimización.

El capítulo está estructurado en dos partes de forma similar a capítulos anteriores. En la primera parte se describe el entorno de simulación así como las modificaciones necesarias para integrar el DPCF en redes multi hop. En la segunda parte, se analiza el rendimiento del DPCF modificado y se compara con el de una red estándar 802.11.

6.2. Escenario de estudio

El estudio del DPCF en un entorno multi hop se ha realizado en un entorno sencillo para facilitar la comprensión de los resultados. El escenario considerado es un tandem de 5 usuarios DPCF. Los usuarios permanecen estáticos en el mismo punto durante toda la simulación.

Los usuarios de la red se sitúan de manera equiespaciada en una matriz de 1 fila por 5 columnas. La distribución espacial de los usuarios en el campo de simulación se muestra en la Figura 30.

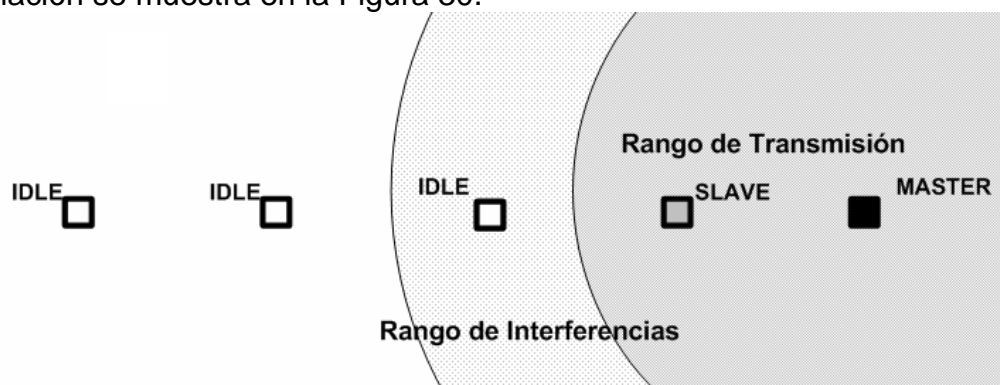


Figura 30. Distribución espacial de 5 usuarios DPCF en una red multi hop.

La potencia de transmisión de cada usuario es de 20 dBm. Este valor es la máxima potencia definida en el estándar IEEE 802.11 para Europa. La distancia entre terminales se ha seleccionado de manera que se cumplan tres condiciones:

1. Condición 1. Un usuario solo ha de ser capaz de transmitir datos directamente a los usuarios de su conjunto, o a los usuarios del conjunto contiguo.
2. Condición 2. Los usuarios que se encuentren a dos saltos, son capaces de detectar que el medio está ocupado, pero no son capaces de decodificar la información transmitida.
3. Condición 3. Los usuarios que se encuentren a tres saltos, no son capaces de detectar las transmisiones del resto de usuarios, por lo tanto, pueden iniciar una transmisión en cualquier instante.

Si se cumplen estas condiciones será posible estudiar el comportamiento de una red DPCF donde pueda existir más de un cluster funcionando a la vez. Dos o más clusters podrán coexistir siempre que sus rangos de transmisión no se solapen.

En el escenario considerado, una posibilidad de coexistencia de clusters se da cuando los móviles situados en los extremos de la red operan como Master simultáneamente. En esa situación los usuarios que están situados en la parte central de la red se bloquearán durante el tiempo que dura un cluster ya que escucharán actividad en el canal pero no serán capaces de decodificarla (se encuentran en el rango de interferencias).

También es posible que coexistan dos clusters cuando algún móvil situado en el centro de la red opera como Master de forma simultánea a un móvil situado en uno de los extremos y sus rangos de transmisión no se solapan.

En un entorno multi hop existe la posibilidad de que algunos usuarios no detecten la actividad de un cluster en el canal debido a que se encuentran fuera del rango de transmisión del transmisor. En ese caso, no hay problema de colisión entre los dos usuarios. Sin embargo, es posible que algunos usuarios se encuentren dentro del rango de recepción de un usuario dentro del cluster. En ese caso, los usuarios pueden intentar establecer una comunicación con ese usuario receptor y provocar una colisión. Este problema, conocido como problema de terminal oculto, es el causante de muchas colisiones y errores en entornos inalámbricos.

Para evitar al máximo la probabilidad de colisión en estos dos entornos, y para integrar el DPCF en un entorno multi hop, ha sido necesario realizar modificaciones del protocolo DPCF. En el siguiente apartado, se describe una posible modificación para integrar el DPCF en redes multi hop y en el último apartado del capítulo se realiza un estudio de su rendimiento y se compara con una red 802.11.

6.3. Modificación del DPCF

La modificación del DPCF se basa en aplicar tiempos de espera mayores a los definidos en el estándar IEE 802.11 descritos en el apartado 2.2.4. La idea básica consiste en conseguir que los usuarios vecinos a un cluster, no interfieran en las comunicaciones de los usuarios asociados al Master durante un periodo de tiempo determinado. Este periodo de tiempo debe ser configurado como un número entero de paquetes de POLL.

Hay que recordar que debido al mecanismo de combinación de paquetes definido en el apartado 2.3.3 las tramas en PCF no tienen longitud fija, y por lo tanto el tiempo entre dos paquetes POLL puede ser variable. Por ese motivo es necesario definir una nueva variable temporal que permita realizar periodos de espera constantes en las redes DPCF.

La nueva variable de espera se denomina *Maximum Interframe Space (MIFS)* y se define como el máximo tiempo que puede existir entre dos paquetes de POLL. Este intervalo es mayor a todos los definidos en el estándar IEEE 802.11. A partir de esta nueva medida, es posible crear nuevos mecanismos para entornos multi hop. Su duración temporal se representa de forma gráfica en la Figura 31.

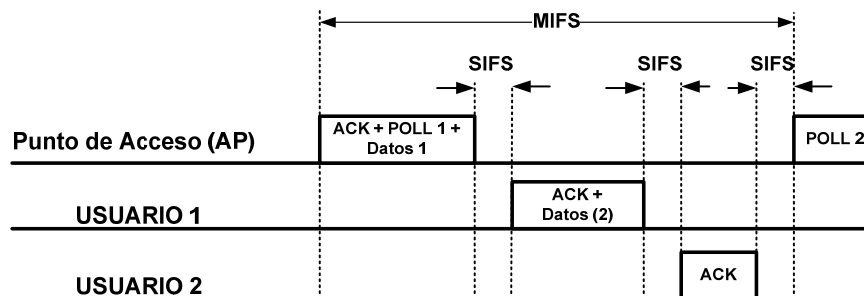


Figura 31. Definición de Maximum Interframe Space (MIFS)

El mecanismo propuesto consiste en la sustitución del intervalo de tiempo de espera DIFS por un intervalo de tiempo de espera mayor. El nuevo periodo temporal del intervalo DIFS se define como un número entero de tiempos MIFS y varía en función del número de usuarios de la red.

Este tiempo de espera debe ser suficiente como para que los usuarios vecinos a un cluster detecten que hay actividad y no intenten acceder al canal durante la comunicación entre dos estaciones de un cluster.

Hay que tener en cuenta que el Master envía paquetes de POLL a todos los usuarios del cluster de forma cíclica, por lo que es posible asegurar que todos los usuarios del cluster transmitirán información en algún momento, y por lo tanto, los usuarios vecinos a un cluster detectarán actividad. Si se configura correctamente la red, es posible asegurar que ningún usuario vecino al cluster interferirá en una comunicación.

La modificación del tiempo DIFS puede provocar que algunos usuarios de la red queden bloqueados durante los periodos de cluster. Sin embargo, minimiza el número de colisiones en un entorno multi hop.

En cualquier caso, es una modificación necesaria para que el protocolo DPCF consiga funcionar en cualquier tipo de entornos. En el siguiente apartado se realiza una evaluación de este mecanismo en un entorno multi hop.

Los parámetros referentes a la configuración de la red DPCF de 5 usuarios son los siguientes; 15 paquetes de POLL entre dos BEACON, MTO=2. Hay que recordar que el MTO es el número de paquetes de BEACON dentro de un cluster, y que en una red multi hop, el número de paquetes de POLL entre dos BEACON es un número entero aleatorio que varia en función de la configuración de la red.

El resto de parámetros referentes a las capas MAC y PHY de las simulaciones se han fijado de acuerdo a los parámetros definidos en el en el apartado 4.3.1 .

6.4. Evaluación del DPCF en entornos multi hop

6.4.1. Evaluación de los resultados.

La evaluación del DPCF en un entorno multi hop se realiza en una red de 5 usuarios. En esta red, los usuarios se distribuyen en una misma fila (ver Figura 30) y cumplen las mismas condiciones de transmisión que las definidas en el apartado 6.2.

En la Figura 32 se muestra el throughput a destino de las dos redes simuladas en función de diferentes cargas de tráfico. Tal y como se esperaba, el rendimiento de la red DPCF es superior al del 802.11. El comportamiento de las dos redes para cargas bajas de tráfico es similar. Esto se debe a que cuando hay poco tráfico en la red, la duración temporal de los clusters es muy pequeña y los móviles DPCF tienden a trabajar con la función DCF.

Sin embargo, para cargas de tráfico altas, el throughput a destino de la red DPCF es mucho mayor al de una red estándar 802.11. El motivo de este aumento de rendimiento se debe al funcionamiento de cada uno de los protocolos.

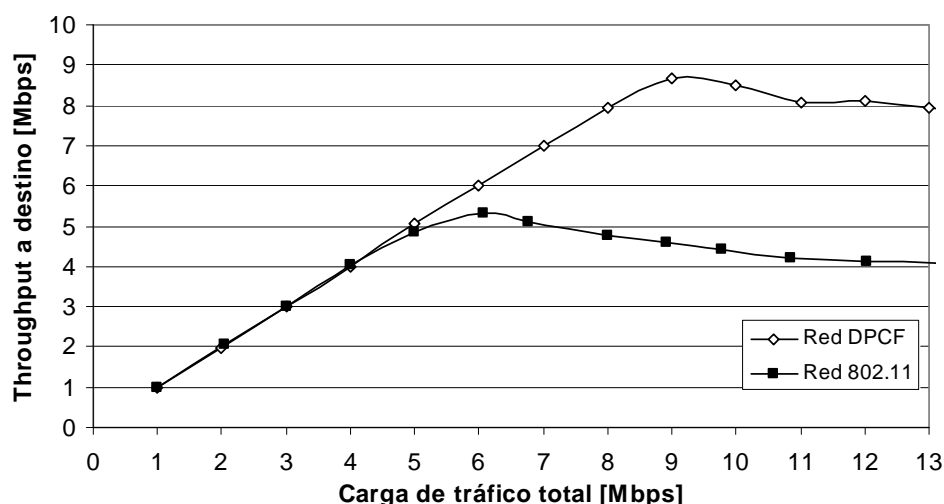


Figura 32. Throughput a destino de las dos redes multi hop (DPCF y 802.11).

En este entorno multi hop los usuarios no solo tienen paquetes de datos para transmitir al destino, sino que contienen paquetes de datos que provienen de otros usuarios y que deben enrutar hacia el destino final. En esta situación, y cuando la carga total de tráfico ofrecida a la red es alta, los usuarios estándar 802.11 se ven desfavorecidos ya que necesitan competir para acceder al canal no solo para transmitir sus propios paquetes de datos, sino también para enrutar información. Esto provoca que el número de colisiones sea elevado y que el throughput a destino de la red se resienta.

Sin embargo, los usuarios DPCF aplican periodos de cluster más largos cuanto mayor es la carga de tráfico ofrecida en la red. Durante estos periodos, no existen colisiones (dentro de un mismo cluster) y los usuarios pueden transmitir tanto paquetes de datos propios como paquetes de datos provenientes de otro usuario para enrutar hacia su destino.

En la Figura 33 se puede observar la media del retardo de transmisión extremo a extremo (a destino) de los paquetes en función de la carga de tráfico ofrecida por la red cuando se ejecuta el DPCF. Hay que tener en cuenta que en una red multi hop los paquetes sufren mayores retardos de transmisión debido a que la información se transmite entre nodos mediante múltiples saltos antes de llegar al destino final.

Tal y como se puede observar, cuando la carga de tráfico ofrecida a la red es baja, el comportamiento de la red 802.11 mejora al de una red DPCF. Esto se debe a que existen muy pocos usuarios que compiten por acceder al canal y prácticamente no existen colisiones. En la red DPCF sucede lo mismo, pero este tipo de redes tienen una carga adicional de paquetes de control necesarios para crear y destruir un cluster, por lo que existe un pequeño incremento en la media del retardo de transmisión. Sin embargo, para cargas de tráfico elevadas, la duración de los periodos de cluster en la red DPCF aumenta, y el número de paquetes de control necesarios disminuye, por lo que la mayoría de tráfico cursado son datos. Gracias a la inexistencia de colisiones durante estos periodos se consigue mejorar la media del retardo de transmisión de las redes 802.11.

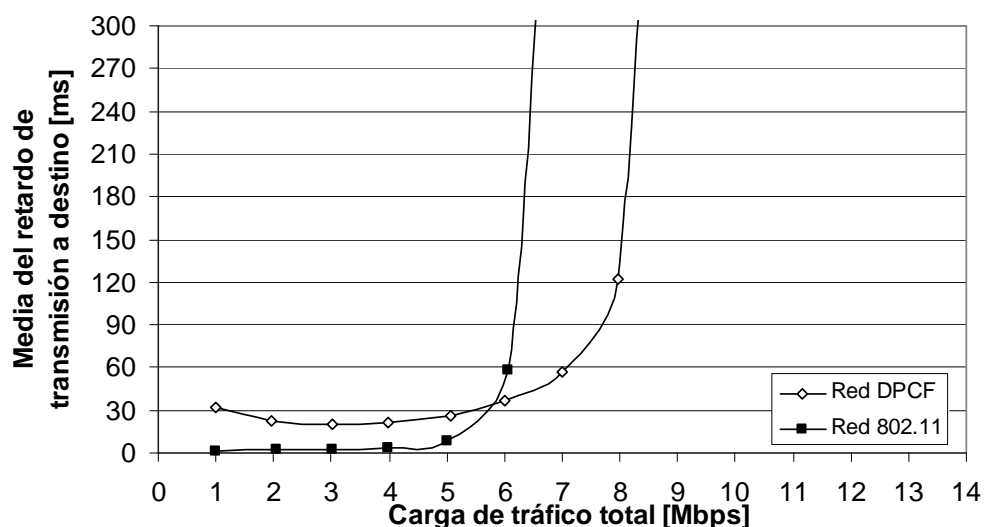


Figura 33. Retardo medio de transmisión a destino de las dos redes multi hop (DPCF y 802.11)

6.4.2. Conclusiones

Los resultados de las simulaciones han mostrado la dificultad de evaluar un entorno multi hop genérico. Tal y como se ha podido observar, el protocolo DPCF es capaz de trabajar en entornos multi hop sencillos. Hay que tener en cuenta que este entorno de simulación es controlado, y que en un entorno real se pueden dar multitud de entornos distintos que habría que analizar individualmente.

Por ese motivo, es necesario seguir investigando nuevos mecanismos que permitan al DPCF actuar de la forma más eficiente en cada uno de los posibles entornos multi hop. Este campo constituye una interesante línea futura de trabajo sobre el protocolo DPCF.

CAPITULO 7. CONCLUSIONES

7.1. Conclusiones técnicas

El diseño y estudio de nuevos protocolos para comunicaciones inalámbricas es necesario para conseguir aumentar el rendimiento de este tipo de entornos y, por lo tanto, poder asumir la incesante popularización de las comunicaciones inalámbricas así como de los contenidos multimedia con exigentes requisitos de calidad de servicio.

En este trabajo se ha presentado un nuevo protocolo MAC llamado DPCF que contribuye a la investigación de nuevos métodos de acceso al medio en redes ad hoc inalámbricas con el objetivo de mejorar la eficiencia de estas redes y contribuir a la evolución de las comunicaciones inalámbricas. Este protocolo organiza de forma espontánea y temporal la red en clusters, siguiendo una arquitectura Master-Slave. Dentro de cada cluster se puede ejecutar un protocolo de alta eficiencia espectral, basado en una gestión centralizada, donde el Master actúa de manera temporal como punto de coordinación, pero permitiendo comunicaciones punto a punto. Mediante simulaciones por ordenador ha sido posible realizar un estudio detallado del comportamiento del DPCF en diferentes entornos.

Los resultados muestran que, en una red ad hoc, el protocolo MAC DPCF es capaz de mejorar el throughput total y el retardo de transmisión de los protocolos MAC DCF y PCF definidos en el estándar IEEE 802.11. Este aumento de rendimiento se consigue cuando los usuarios de la red cooperan entre sí y cada uno de ellos actúa como Master de forma periódica a lo largo del tiempo.

De cara a evaluar su posible integración y coexistencia en redes actuales 802.11, se ha evaluado el rendimiento de una red en un entorno mixto ad hoc, donde existen usuarios 802.11 y DPCF. Esto es posible debido a que los usuarios DPCF son duales y son capaces de trabajar tanto con la función DCF como con la función PCF del estándar. Los resultados muestran que los terminales DPCF son capaces de coexistir con terminales estándar 802.11 ya que el throughput total de la red está contenido entre el throughput total de las redes DPCF y 802.11 aisladas. Además, se ha detectado que el aumento del periodo de DCF que se aplica después de cada cluster provoca que la mejora que perciben los usuarios en modo DPCF se vea reducida, a pesar de que esta disminución nunca es inferior al throughput total del mismo número de usuarios estándar. También se ha detectado que el aumento de este periodo DCF aumenta el throughput total de los usuarios 802.11 por lo que se convierte en un parámetro muy importante en la configuración de una red mixta.

A pesar de que el mejor rendimiento del DPCF se obtiene cuando los usuarios tienden a estar agrupados en un mismo rango de transmisión, se ha comprobado que también puede operar en entornos multi hop.

Los objetivos iniciales del trabajo eran diseñar un nuevo protocolo MAC para redes ad hoc que consiguiera utilizar mecanismos de acceso avanzado para integrar el protocolo en redes estándar 802.11. Se puede concluir que el trabajo ha conseguido cumplir con éxito los objetivos planteados, ya que el DPCF es un protocolo MAC para redes ad hoc inalámbricas y puede trabajar en entornos estándar 802.11. Además, se ha conseguido mejorar el rendimiento de las funciones DCF y PCF definidas en ese estándar.

La realización de este proyecto me ha permitido ampliar los conceptos sobre comunicaciones inalámbricas, y adquirir conocimientos de los protocolos MAC y de las problemáticas asociadas a este tipo de entornos. A lo largo del trabajo, se ha utilizado la tecnología de simulación por ordenador de redes de comunicación. La programación orientada a objetos y aplicada a simulación de comunicaciones ha supuesto un reto importante para mí ya que no había trabajado antes en un proyecto similar. La impresión final de este trabajo es excelente, ya que los conocimientos adquiridos a lo largo de su desarrollo son de gran utilidad en el ámbito de las telecomunicaciones.

7.2. Estudio medioambiental

En el diseño del protocolo DPCF se han tenido en cuenta una serie de premisas que contribuyen al ahorro energético y a la minimización de las transmisiones de información innecesarias.

Los usuarios DPCF crean clusters temporales con un mínimo de paquetes de control. Aprovechan campos no utilizados de las cabeceras MAC para optimizar los recursos y minimizar las interferencias electromagnéticas.

Además, utilizan un mecanismo de detección de inactividad que acorta los periodos de clustering si la red no tiene información a transmitir, y así se consigue disminuir el ahorro energético de las baterías de los terminales que actúan como Master y se minimiza el número de paquetes de POLL enviados al medio de forma innecesaria.

7.3. Líneas futuras de investigación

Existen diferentes líneas futuras de investigación a partir de este proyecto, de entre las cuales cabe destacar la optimización del protocolo DPCF para diferentes entornos.

Alguno de los aspectos que se pueden optimizar de este protocolo son:

1. La gestión de la cola de polling mediante el diseño de un scheduler. Tal y como se ha observado, el método de Round Robin no aporta ningún tipo de beneficio a las redes que implementan la función PCF. Por ese motivo, es necesario diseñar algún mecanismo que aporte prioridades en el envío de paquetes de POLL.
2. El tiempo de DCF después de cada periodo de cluster. En entornos mixtos existe un compromiso entre los periodos de DCF y el tiempo de

cada cluster. Es probable que dinamizando el periodo de DCF después de cada cluster se mejore el rendimiento de este tipo de redes.

3. El funcionamiento del DPCF en redes multi hop. Debido a la gran variedad de posibilidades multi hop existentes, es difícil estudiar el comportamiento de un protocolo de forma real. Por ese motivo, es necesario estudiar y optimizar el funcionamiento del DPCF en entornos multi hop. En este trabajo se ha propuesto un mecanismo que permiten al DPCF trabajar en cualquier tipo de entorno. Sin embargo, se debe seguir trabajando en este campo para mejorar su rendimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Samba Sesay, Zongkai Yang, Jianhua He, "A survey on Mobile Ad Hoc Wireless Network", *Information Technology Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 168-175, 2004.
- [2] IEEE Std. 802.11 WG, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", 1999, Standard.
- [3] Jesús Alonso, Luis Alonso, "A Novel MAC Protocol For Dynamic AD HOC Wireless Networks With Dynamic Self-Configurable Master-Slave Architecture", In *Proc. of the IEEE Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'04)*, Barcelona (Spain), September 2004.
- [4] J. Alonso-Zárata, E. Kartsakli, A. Cateura, C. Verikoukis and L. Alonso, "A Near-Optimum Cross-Layered Distributed Queuing Protocol for Wireless LAN", *IEEE Wireless Communication Magazine*, Special Issue on MAC protocols for WLAN, vol. 15, no. 1, February 2008, pp. 48-55.
- [5] R. Bruno, M. Conti, E. Gregori, "WLAN technologies for Mobile ad hoc Networks", *System Sciences*, 2001. *Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 1-11, 2001,
- [6] Brian P. Crow, Indra Widjaja, Jeong Geun Kim, Prescott T. Sakai, "IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 9, pp.116 – 126, 1997.
- [7] Carlos T. Calafate, Pietro Manzoni, Manuel P. Malumbres, "Assessing the effectiveness of IEEE 802.11e in multi hop mobile network environments", In *Proc. of the IEEE Computer Society's 12th Annual International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunications Systems (MASCOTS'04)*, 2004.
- [8] Jesús Alonso, "Estudio y Análisis de Técnicas de Acceso y Algoritmos de Adaptación Dinámica de Topología de Redes Inalámbricas Ad Hoc Autoconfigurables", *Proyecto Final de Carrera UPC*, Director: Luis Alonso, Marzo 2004.
- [9] J. Yeo, M. Youssef and A. Agrawala, "Characterizing the IEEE 802.11Traffic: The Wireless Side", *Technical Report*, Univ. of Maryland, College Park, Rep. CS-TR-4570, Mar. 2004.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de referencia del estándar IEEE 802.11	7
Figura 2. Extensión DQCA y PCF a redes sin infraestructura	8
Figura 3. Acceso básico al canal mediante la función de coordinación DCF ...	11
Figura 4. Acceso al canal mediante RTS/CTS en la función de coordinación DCF	11
Figura 5. Acceso al medio mediante la función de coordinación PCF	15
Figura 6. Sincronismo periodos DCF y PCF	16
Figura 7. Estructura de trama MAC del DQMAN	17
Figura 8. Interrelación de las clases del simulador MACSWIN	19
Figura 9. Ventana principal del simulador MACSWIN	21
Figura 10. Menú de configuración del simulador MACSWIN	21
Figura 11. Ampliación del menú de configuración del simulador MACSWIN ...	23
Figura 12. Ampliación del menú de baterías de simulación del simulador MACSWIN	23
Figura 13. Modificación del estado de los móviles en la ventana principal durante una simulación del simulador MACSWIN	24
Figura 14. Red DPCF	26
Figura 15. Inicialización de un cluster en DPCF	28
Figura 16. Diagrama de estados DPCF	30
Figura 17. Comparación de throughput de los terminales DPCF, PCF y DCF .	33
Figura 18. Probabilidad global de transmitir datos al canal en un "Transmission Opportunity" (TXOP)	34
Figura 19. Oportunidades de acceder al canal por segundo por usuario del AP y valor medio de oportunidades de acceder al canal de los usuarios DCF y PCF	35
Figura 20. Probabilidad de transmitir datos al canal en un "Transmission Opportunity" (TXOP) por usuario.	35
Figura 21. Valor medio de oportunidades de acceder al canal por segundo por usuario.	36
Figura 22. Comparación de la media del retardo de transmisión de las 3 redes (DPCF, PCF y DCF)	37
Figura 23. Sustitución paquetes BEACON y CF END en entorno mixto	39
Figura 24. Diagrama de estados de un usuario que recibe un CTS	40
Figura 25. Periodos de tiempo DCF y PCF en DPCF	41
Figura 26. Throughput total de las redes Mixta y 802.11	42
Figura 27. Throughput del conjunto de usuarios 802.11	43
Figura 28. Throughput del conjunto de usuarios DPCF	44
Figura 29. Media del retardo de TX de las redes Mixta, DPCF y 802.11	44
Figura 30. Distribución espacial de 5 usuarios DPCF en una red multi hop....	46
Figura 31. Definición de Maximum Interframe Space (MIFS)	48
Figura 32. Throughput a destino de las dos redes multi hop (DPCF y 802.11).49	
Figura 33. Retardo medio de transmisión a destino de las dos redes multi hop (DPCF y 802.11)	50

ANEXOS

ANEXO I. IMPLEMENTACIÓN DE TRES NUEVOS PROTOCOLOS DE ACCESO EN MACSWIN.

En este anexo se puede describe el desarrollo realizado en el simulador MACSWIN en el contexto de este trabajo. Hay que destacar que los protocolos programados han sido integrados en un código que ya estaba programado y estructurado en diferentes clases. La adaptación al código del simulador MACSWIN ha supuesto un esfuerzo extra a la realización del trabajo. Sin embargo, la implementación de nuevas clases en el simulador, y la modificación de partes ya existentes era un requisito necesario para la realización del proyecto aunque no un objetivo en sí mismo. Por ese motivo, en este anexo se realiza un breve resumen de las modificaciones realizadas en MACSWIN.

La modificación del MACSWIN se ha centrado en el desarrollo de tres nuevas clases que implementase protocolos de acceso. Un móvil se representa como una clase independiente. Las 3 clases implementadas han seguido un orden determinado y se han implementado una a una, de forma que cada clase contiene código de la función implementada anterior.

La función PCF ha sido la primera clase programada en este simulador. Hay que recordar que el simulador está estructurado en dos partes, una visual y el núcleo principal del programa. Dentro de este núcleo existen diferentes clases que se interrelacionan entre sí para conseguir ejecutar el simulador.

Una de las clases más importantes del simulador MACSWIN es la clase que define las reglas de cada protocolo MAC. A lo largo del trabajo se han programado tres nuevos protocolos MAC en tres clases distintas a las existentes que aportan nuevas oportunidades de simulación a MACSWIN.

El primer protocolo MAC programado se ha implementado en una nueva clase llamada **MovilPCF**. En esta clase, se han implementado las reglas y mecanismos que se especifican en la función de coordinación PCF de forma estructurada mediante funciones. La función principal de esta clase es:

```
Void paso_iteración_PCF(long it_actual, canal &micanal)
```

La función tiene dos parámetros de entrada. El primero de ellos indica la iteración actual de simulación y permite simular el paso del tiempo. El segundo parámetro es un objeto llamado "micanal" y simula el canal de transmisión.

La idea básica de funcionamiento de esta clase es seguir un diagrama de estados. El esqueleto básico de esta función es un switch. De esta forma, se pueden implementar todos los posibles estados por los que pasa un móvil que implementa el protocolo MAC PCF:

```

Switch (estado)
{
    case OFF:
    case IDLE:
    case ESTADO_PIFS:
    case ESTADO_SIFS:
    case ESTADO_WAITING_POLL:
    case ESTADO_WAITING_TX:
    case ENVIANDO_CONTROL:
    case ENVIANDO_DATOS_PCF:
    case RECIBIENDO_CONTROL:
    case RECIBIENDO_DATOS:
    case ESTADO_END:
}

```

Durante una simulación, se crean móviles que implementan esta nueva clase y por lo tanto, que actúan siguiendo las normas del PCF. Cada móvil se encuentra en un estado distinto en función de su papel durante una simulación.

Cuando se inicia una simulación, todos los móviles que implementan este protocolo están apagados y en modo OFF. De forma aleatoria, el móvil se activa y cambia su modo de trabajo a IDLE. Un móvil se encuentra en estado IDLE cuando no tiene datos a transmitir o cuando se activa. A partir de aquí el móvil puede pasar a distintos modos en función del tráfico que se genere en la red.

Tal y como se puede observar, existen 4 casos en los que se aplican periodos de espera. Los estados SIFS, y PIFS definen los intervalos de espera. En estos estados, los móviles escuchan el canal durante el tiempo determinado y esperan a recibir datos o control, de la misma forma que se define en el estándar IEEE 802.11. Los estados Waiting POLL y Waiting TX son periodos de espera que aplica un móvil en una simulación cuando se encuentra en espera de recibir un paquete de POLL para acceder al canal, o en la finalización de un periodo de transmisión ajeno cuando el móvil actúa como AP.

La clase `movilPCF` también contiene otro tipo de funciones auxiliares, comunes para algunos modos de funcionamiento, que han facilitado y simplificado el código principal de la clase. Estas funciones son:

1. `void movilPCF::prepara_paquete_DATOS_PCF()`
2. `void movilPCF::prepara_paquete_CONTROL_PCF(bool beacon, bool cf_end, bool lleva_ack, int id_destino_ACK, bool lleva_POLL, int id_destino_POLL)`
3. `void movilPCF::interpreta_BEACON()`
4. `void movilPCF::interpreta_CF_END()`
5. `void movilPCF::interpreta_POLL()`
6. `void movilPCF::interpreta_CF_ACK()`
7. `void movilPCF::interpreta_DATOS_PCF()`
8. `void movilPCF::interpreta_CONTROL_PCF()`

Tal y como se puede observar, la mayoría de funciones auxiliares realizan tareas relacionadas con los paquetes de control y datos del protocolo MAC. Por un lado, es necesario preparar nuevos paquetes de control característicos en la función 802.11 como son los paquetes de BEACON, CF END, POLL... y por otro lado, es necesario crear funciones independientes que interpreten toda la información que contienen estas unidades de información.

El segundo paso ha consistido en la implementación de un nuevo protocolo MAC programado en una nueva clase y llamado **movil80211infraestructura**. En esta clase se han implementado las reglas y mecanismos que se especifican en las funciones de coordinación PCF y DCF cuando actúan en una red con infraestructura.

Hay que recordar que en una red en modo infraestructura existe un AP que es el encargado de gestionar los recursos de la red. En esta situación, se pueden aplicar tanto las dos funciones de coordinación (DCF y PCF) definidas en el estándar IEEE 802.11.

La estructura básica de esta clase es similar a la clase **movilPCF**. En este caso, existen dos funciones básicas que son.

```
void paso_iteración_PCF(long it_actual, canal &micanal)
void paso_iteracion_80211(long it_actual, canal &micanal)
```

Las dos funciones tienen los mismos parámetros de entrada que la clase **movilPCF**. La estructura de estas funciones se repite en todos los móviles MAC programados en el simulador MACSWIN. De esta forma, se consigue estandarizar el código de simulador y se facilita la tarea de reprogramación del simulador a lo largo del tiempo.

La primera función “**paso_iteración_PCF**” es la misma que la utilizada para implementar la clase **movilPCF**. En un entorno 802.11 en modo infraestructura es posible aplicar la función PCF durante un tiempo determinado, por lo tanto, la finalidad de esta función es reproducir durante un periodo acotado de tiempo las mismas reglas y mecanismos MAC que se definen en esa función. Además, utiliza el mismo diagrama de estados de la clase **móvilPCF** y todas sus funciones auxiliares.

En la función **paso_iteración_80211** se han implementado las reglas y mecanismos de la función de coordinación DCF. Esta clase simula los diferentes estados por los que pasa un móvil 802.11 durante un periodo DCF. El código de esta función ya estaba implementado en el simulador pero se utilizaba en redes ad hoc, es decir, los paquetes de datos se envían a cualquier destino de la red. Ha sido necesario reestructurar el enrutamiento de paquetes de datos para canalizar todo el tráfico por el AP.

Esta modificación solo ha supuesto un cambio en una función de la clase MAC, genérica para todos los móviles MAC del simulador. La función modificada se denomina:

```
void movilMAC::prepara_paquete_DATOS()
```

Esta función la heredan todas las clases de móviles MAC. Cada uno de ellos le aplica sus modificaciones en la clase concreta, pero en la clase MAC se encuentra el código original común para todas las clases que implementan un protocolo MAC. Dentro de esta función se utiliza una tabla de enrutado ya existente en el simulador. Esta tabla es capaz de enrutar un paquete de datos hacia el destino final en cualquier red. Si el móvil destino de la información se encuentra en el mismo rango de transmisión que el móvil que genera el paquete, el siguiente salto del paquete corresponde con el destino final. Sin embargo, si el destino se encuentra a varios saltos de distancia, la tabla de enrutado asigna el siguiente destino del paquete a un nodo intermedio que pueda enrutar el paquete hacia su destino final.

Los móviles simulados que implementen la clase `movil80211infraestructura` deben canalizar el tráfico de datos por el móvil de la red que actúa como access point, por lo que no utilizan esta tabla. Sin embargo el access point si que la debe utilizar para enrutar la información hacia su destino. Las líneas de código modificadas en esta función se muestran a continuación:

```
void movilMAC::prepara_paquete_DATOS()
{
    .....

    if( (MAC==MAC_DCF_PCF)&&(soy_access_point==false))
    {
        paq.destino_next_hop = direccion_AP;
    }
    Else
    {
        paq.destino_next_hop=routing_table[paq.destino];
    }
    ....
}
```

La interconexión de las dos funciones se realiza mediante una función genérica denominada.

```
void paso_iteración_MAC(long it_actual, canal &micanal)
```

Esta función engloba las dos funciones anteriormente definidas (`paso_iteración_PCF` y `paso_iteracion_80211`). La finalidad es interconectar los periodos DCF y PCF en una misma función para que puedan ser ejecutadas en una misma clase y en un mismo protocolo MAC.

En una red simulada en la que sw implementa el protocolo MAC programado en la clase `movil80211infraestructura` todos los móviles se configuran por defecto para que puedan trabajar tanto en PCF como en DCF, y solo uno de ellos actúa de AP. El AP no genera tráfico propio y su misión es encaminar los paquetes que recibe del conjunto de terminales. Además, es el encargado de fijar los periodos temporales de trabajo en cada función (DCF y PCF).

Para conseguir sincronizar los dos periodos se han creado dos contadores que se van decrementando con cada iteración. Cuando los contadores de los periodos se anulan, el AP envía un paquete POLL o un cf end y automáticamente los usuarios cambian de modo de operación. A continuación se detallan alguna de las partes de esta función:

```
void paso_iteracion_MAC(long it_actual, canal &micanal)
{
    ...

    if(estoy_en_modos_CFP==true)
    {
        if(soy_access_point==true){contador_beacon++;}
        contador_tiempo_CFP--;
        paso_iteracion_PCF(it_actual, micanal);
    }
    else
    {
        contador_tiempo_CP--;
        paso_iteracion_80211(it_actual,micanal);
    }
    ...
}
```

Se puede observar como se deben decrementar los contadores de tiempo de cada periodo después de cada iteración y se deben aplicar una de las dos funciones básicas en función del periodo de trabajo en el que se encuentren.

El esqueleto básico de la función “paso_iteracion_80211” es similar al de la misma función para el periodo PCF. A continuación se puede observar los diferentes estados en los que trabajan los móviles.

```
Switch (estado)
{
    case OFF:
    case IDLE:
    case BACK_OFF:
    case WAIT_IDLE_CHANNEL:
    case ESTADO_SIFS:
    case ESTADO_DIFS:
    case RECIBIENDO_RTS:
    case RECIBIENDO_CTS:
    case RECIBIENDO_DATOS:
    case RECIBIENDO_ACK:
    case ENVIANDO_RTS:
    case ENVIANDO_CTS:
    case ENVIANDO_DATOS:
    case ENVIANDO_ACK:
}
```

Tal y como se puede observar, los modos de funcionamiento programados corresponden a todos los estados posibles de un usuario 802.11 en modo DCF. Los dos primeros estados son similares a los de la clase PCF. Cuando empieza la simulación todos los móviles de la red están apagados (OFF) y cuando se activan cambian de estado y operan en modo Idle. En este caso, también hay modos específicos para indicar los periodos de espera SIFS o DIFS característicos del DCF o los estados de transmisión y recepción de

información, que se diferencian por el tipo de paquetes que se está enviando o recibiendo.

Por último se han utilizado las funciones auxiliares que simulan alguno de los mecanismos más característicos de la función DCF. A continuación se enumeran todas ellas.

1. void movil80211infraestructura::escucha_el_paquete()
2. void movil80211infraestructura::set_ventana_backoff()
3. void movil80211infraestructura::virtual_carrier_sensing(paquete &paq)
4. void movil80211infraestructura::interpreta_RTS()
5. void movil80211infraestructura::interpreta_CTS()
6. void movil80211infraestructura::engancha_RTS()
7. void movil80211infraestructura::go_to_backoff()
8. bool movil80211infraestructura::CCA_80211()
9. void movil80211infraestructura::interpreta_packet_header_80211()
10. void movil80211infraestructura::voy_a_transmitir_datos_80211(canal &micanal)
11. void movil80211infraestructura::prepara_paquete_RTS()
12. void movil80211infraestructura::prepara_paquete_CTS()

Por último, se ha implementado una nueva clase llamada **móvilDPCF**. Esta clase implementa las reglas básicas del nuevo protocolo MAC diseñado en el proyecto. Su implementación ha sido completamente necesaria para su evaluación en diferentes entornos.

Su estructura básica se basa en en la clase móvil80211infraestructura. Está formada por dos funciones de coordinación llamadas.

```
void paso_iteración_PCF(long it_actual, canal &micanal)
void paso_iteracion_80211(long it_actual, canal &micanal)
```

De la misma forma que en la clase en modo infraestructura, este nuevo protocolo MAC permite operar tanto en modo DCF como en modo PCF. Sin embargo, este protocolo solo se utiliza en redes tipo ad hoc, por lo que no existe ningún dispositivo que actúe como AP.

El funcionamiento de esta clase en redes ad hoc es posible gracias a las reglas del protocolo MAC DPCF diseñado en el trabajo. En este protocolo se puede operar en los tres modos de funcionamiento definidos por el DPCF (Idle, Slave o Master). De esta forma, en una red ad hoc se crean clusters temporales dentro de los cuales es posible utilizar las reglas del PCF.

Además, este protocolo permite crear móviles duales, que sean capaces de comunicarse con móviles estándar 802.11. Gracias a esto ha sido posible crear entornos mixtos con usuarios 802.11 y duales y evaluar el rendimiento del protocolo DPCF en estas situaciones.

La relación entre las dos funciones básicas se realiza de nuevo con la función genérica:

```
void paso_iteración_MAC(long it_actual, canal &micanal)
```

En este caso, el código de esta función es algo distinto ya que los cambios de periodo entre DCF y PCF no se realizan de la misma forma. Ha sido necesario definir tres modos de funcionamiento. Esto ha permitido por un lado, diferenciar las funciones de trabajo en cada modo de funcionamiento, y por otro, realizar medidas estadísticas de la red en cada modo. A continuación se puede observar parte del código de esta función genérica.

```
void paso_iteracion_MAC(long it_actual, canal &micanal)
{
    switch (modo)
    {
        case SINMOD0:
            it_sin_mod0++;
            break;
        case SLAVE:
            it_Slave++;
            break;
        case MASTER:
            it_Master++;
            break;
    }

    if(inicio_cambio_periodo==true){it_perdidas++;}

    if(estoy_en_mod0_CFP==false)
    {
        if(he_recibido_BEACON_y_no_soy_MIXTO==false){contador_tiempo_CP--;}

        paso_iteracion_80211(it_actual,micanal);
    }
    else
    {
        contador_tiempo_CFP--;
        paso_iteracion_PCF(it_actual,micanal);
    }
}
```

Tal y como se puede observar, la interconexión entre los dos periodos (PCF y DCF) es muy parecida a la del móvil 80211 en modo infraestructura. La diferencia principal es la caracterización de tres modos de funcionamiento, que ha permitido crear clusters temporales en un entorno ad hoc y de esta manera, conseguir implementar y estudiar el rendimiento del DPCF en diferentes entornos.

Hay que tener en cuenta que en el desarrollo de estas tres clases ha sido necesario realizar pequeños cambios en prácticamente todas las clases que se interrelacionan con la clase móvil, como las clases móvil MAC, móvil TX, o incluso la clase paquete. Estos cambios no se describen en este anexo.